



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**  
**CENTRO TECNOLÓGICO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

---

**ESTUDO DO MECANISMO DE ALAGAMENTO E  
SECAMENTO EM MODELO COMPUTACIONAL 2DH  
BASEADO EM ELEMENTOS FINITOS**

---

**JORLAINE MACHADO DE SIQUEIRA**

VITÓRIA, E.S. – BRASIL  
FEVEREIRO DE 2007

JORLAINE MACHADO DE SIQUEIRA

**ESTUDO DO MECANISMO DE ALAGAMENTO E  
SECAMENTO EM MODELO COMPUTACIONAL 2DH  
BASEADO EM ELEMENTOS FINITOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Ambiental.  
Orientador: Prof. D.Sc. Daniel Rigo.  
Co-orientador: Prof. Ph.D. Paulo Cesar Colonna Rosman.

VITÓRIA

2007

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

S618e Siqueira, Jorlaine Machado de, 1974-  
Estudo do mecanismo de alagamento e secamento em modelo  
computacional 2DH baseado em elementos finitos / Jorlaine  
Machado de Siqueira. – 2007.  
111 f. : il.

Orientador: Daniel Rigo.  
Co-Orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito  
Santo, Centro Tecnológico.

1. Inundações. 2. Método dos elementos finitos. 3.  
Escoamento. 4. Marés. 5. Estuários. 6. Modelagem computacional.  
I. Rigo, Daniel. II. Rosman, Paulo Cesar Colonna. III. Universidade  
Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 628

---

**JORLAINE MACHADO DE SIQUEIRA**

**ESTUDO DO MECANISMO DE ALAGAMENTO E  
SECAMENTO EM MODELO COMPUTACIONAL 2DH  
BASEADO EM ELEMENTOS FINITOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Ambiental.

Aprovada em 28 de fevereiro de 2007.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

**Prof. D.Sc. Daniel Rigo**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**  
**Orientador**

---

**Prof. Ph.D. Paulo Cesar Colonna Rosman**  
**Universidade Federal do Rio de Janeiro**  
**Co-Orientador**

---

**Prof. Dr. Julio Tomás Aquije Chacaltana**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**  
**Examinador Interno**

---

**Prof<sup>a</sup>. Dra. Thereza Christina de Almeida Rosso**  
**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**  
**Examinadora Externa**

À minha esposa Regiane, aos meus pais, irmãos,  
sobrinha e familiares.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, sem o qual eu nada seria e nada poderia, pela graça de realizar este trabalho.

A todos que aqui tiveram sua contribuição, indiferentemente, se de forma direta ou indireta.

Ao Prof. Daniel Rigo, pelos seus ensinamentos que me motivaram à pesquisa, pela orientação, pela compreensão, pela paciência, pela amizade e pelo apoio nas diversas situações.

Ao Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman, pela disponibilização ao GEARH (Grupo de Estudos e Ações em Recursos Hídricos) do modelo computacional SisBaHiA, utilizado nesta pesquisa, pela co-orientação, pelo enriquecimento a partir de discussões e pela sua atenção indispensável.

Ao Prof. Julio Tomás Aquije Chacaltana pelos seus ensinamentos que contribuíram para o meu crescimento pessoal e meu desenvolvimento intelectual, e pela amizade adquirida.

À Prof<sup>a</sup>. Jane Meri Santos (coordenadora do PPGEA), à Prof. Edumar Ramos Cabral Coelho (ex-coordenadora adjunta do PPGEA), Teixeira (ex-secretário do PPGEA), Karen (ex-secretária do PPGEA) e Ibanês (secretária do DEA) pelo apoio institucional.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pela concessão da bolsa de estudos, já no final do curso, viabilizando a realização desta dissertação.

À UFES, por intermédio do PPGEA, pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa e pelo favorecimento ao meu crescimento pessoal e profissional.

A todos os meus familiares e amigos que de alguma forma tiveram sua participação.

Ao meu primo Maurício pelo incentivo, pela motivação, pela troca de idéias e pela amizade.

Ao meu amigo Daniel Izoton pelos ensinamentos na área oceanográfica, treinamento do modelo computacional SisBaHiA e pelas horas de estudo, realização de tarefas em conjunto e todo apoio prestado.

À toda equipe do EMANA, em especial à, Teresa Aquije, Andressa, Geovane, Márcio, Nelson, José Paulo e Silvia, pelo incentivo e apoio.

Aos colegas e amigos do mestrado Jorge Lacerda, Letícia Tagarro, Marcos Eugênio, Maurício Sartori, Tatiana Vieira, e Vanusa Pratti, dentre outros, pelos bons momentos vividos.

## **MONTE CASTELO**

**Ainda que eu falasse a língua dos homens**

**E falasse a língua do anjos,**

**Sem amor eu nada seria.**

**É só o amor,**

**É só o amor**

**Que conhece o que é verdade**

**O amor é bom, não quer o mal**

**Não sente inveja ou se envaidece**

**O amor é o fogo que arde sem se ver**

**É ferida que dói e não se sente**

**É um contentamento descontente**

**É dor que desatina sem doer**

**Ainda que eu falasse a língua dos homens**

**E falasse a língua dos anjos,**

**Sem amor eu nada seria.**

**É um não querer mais que bem querer**

**É solitário andar por entre a gente**

**É um não contentar-se de contente**

**É cuidar que se ganha em se perder**

**É um estar-se preso por vontade**

**É servir a quem vence, o vencedor**

**É um ter com quem nos mata a lealdade**

**Tão contrario a si é o mesmo amor**

**Estou acordado e todos dormem**

**Todos dormem, todos dormem**

**Agora vejo em parte**

**Mas então veremos face a face**

**É só o amor, é só o amor**

**Que conhece o que é verdade**

**Ainda que eu falasse a língua dos homens**

**E falasse a língua do anjos,**

**Sem amor eu nada seria.**

**Letra e música: Renato Russo**

**Inc. Adapt. "I Coríntios 13" e "Soneto 11" de Luís de Camões**



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Grade de Richardson, adaptada de George e Stripling (1995). ....	34
Figura 2.2 – Células com fundo plano. Os números indicam as elevações acima do nível médio do mar (m), adaptada de George e Stripling (1991).....	36
Figura 2.3 – Facetas inclinadas. Os números indicam as elevações acima do nível médio do mar (m), adaptada de George e Stripling (1991). ....	36
Figura 2.4 – Corte de uma célula com fundo inclinado, adaptado de George e Stripling (1991). ....	37
Figura 2.5 – Área molhada de uma célula com fundo inclinado para o caso em que $h_1 < \zeta < h_2$ , adaptado de George e Stripling (1991).....	38
Figura 2.6 – Área molhada de uma célula com fundo inclinado para o caso em que $h_2 < \zeta < h_3$ , adaptado de George e Stripling (1991). ....	38
Figura 2.7 – Área molhada de uma célula com fundo inclinado para o caso em que $h_3 < \zeta < h_4$ , adaptado de George e Stripling (1991). ....	39
Figura 2.8 – (a) Representação idealizada da mudança na seção de escoamento considerada no método de fissura padrão ; (b) Representação aproximada da mudança na seção de escoamento (com parâmetros da opção de pântano $h_B$ , $h_R$ e $P$ ) considerada na opção de pântano; adaptada de Nielsen e Apelt (2003). ....	42
Figura 3.1 – Sistema de coordenadas utilizado pelo SisBaHiA tanto na modelagem 3D quanto na modelagem 2DH, sendo NR o nível de referência. No	

caso 2DH, $U_i$ , representa a velocidade promediada na vertical. As coordenadas e velocidades horizontais são representadas como $(x, y) \equiv (x_1, x_2)$ e $(u, v) \equiv (u_1, u_2)$ utilizando o índice $i = 1, 2$ , adaptado de Rosman et al. (2006).	53
Figura 3.2 – Esquema do contorno permeável tipo planície de maré, adaptado de Rosman et al. (2006).	61
Figura 3.3 – Geometria idealizada, denominada $G_1$ , modelada pelo SisBaHiA utilizando o mecanismo de alagamento e secamento real.	65
Figura 3.4 – Seção transversal da topografia de fundo da geometria idealizada ' $G_1$ ', modelada pelo SisBaHiA utilizando o mecanismo de alagamento e secamento real. Os pontos representam os nós da malha real.	66
Figura 3.5 – Séries temporais de elevação de maré calculadas pelo SisBaHiA em estações situadas longitudinalmente no meio do canal da geometria $G_1$ considerando altos valores de rugosidade de fundo no talude e na faixa de amortecimento, utilizando o mecanismo de alagamento e secamento real.	67
Figura 3.6 – Séries temporais de velocidade longitudinal calculadas pelo SisBaHiA em estações situadas longitudinalmente no meio do canal da geometria $G_1$ , utilizando o mecanismo de alagamento e secamento real.	68
Figura 3.7 – Geometria idealizada, denominada $G_2$ , modelada pelo SisBaHiA utilizando o mecanismo de alagamento e secamento real.	69

Figura 3.8 – Seção transversal da topografia de fundo da geometria idealizada ‘G <sub>2</sub> ’, modelada pelo SisBaHiA utilizando o mecanismo de alagamento e secamento real. Os pontos representam os nós da malha real. ....	69
Figura 3.9 – Séries temporais de elevação de maré calculadas pelo SisBaHiA na simulação 1, em estações situadas longitudinalmente no meio do canal de G <sub>2</sub> , utilizando o mecanismo de alagamento e secamento real.....	71
Figura 3.10 – Séries temporais de velocidade longitudinal calculadas pelo SisBaHiA na simulação 1, em estações situadas longitudinalmente no meio do canal de G <sub>2</sub> , utilizando o mecanismo de alagamento e secamento real. .....	71
Figura 3.11 – Séries temporais de elevação de maré calculadas pelo SisBaHiA na simulação 2, em estações situadas longitudinalmente no meio do canal de G <sub>2</sub> , utilizando o mecanismo de alagamento e secamento real.....	73
Figura 3.12 – Séries temporais de velocidade longitudinal calculadas pelo SisBaHiA na simulação 2, em estações situadas longitudinalmente no meio do canal de G <sub>2</sub> , utilizando o mecanismo de alagamento e secamento real. .....	73
Figura 3.13 – Séries temporais de elevação de maré calculadas pelo SisBaHiA em estações situadas longitudinalmente no meio do canal da geometria G <sub>2</sub> , utilizando o mecanismo de alagamento e secamento virtual de planícies de maré. ....	76
Figura 3.14 – Séries temporais de velocidade longitudinal calculadas pelo SisBaHiA em estações situadas longitudinalmente no meio do canal da	

geometria $G_2$ , utilizando o mecanismo de alagamento e secamento virtual de planícies de maré.....	76
Figura 3.15 – Dimensões do canal de planície de maré reto utilizado nesta pesquisa para avaliar o mecanismo de alagamento e secamento virtual: (a) Vista plana; (b) Vista da seção transversal na boca do canal. ....	77
Figura 3.16 – Dimensões de um sistema de manguezal reto: (a) Vista plana; (b) Vista da seção transversal na boca do canal, adaptado de Wu, Falconer e Struve (2001).....	81
Figura 3.17 – Série temporal de velocidade longitudinal calculada na estação ‘B’ do canal da geometria utilizada no experimento de Wu, Falconer e Struve (2001), adaptada destes autores.....	82
Figura 3.18 – Dimensões do canal de planície de maré reto utilizado: (a) Vista plana; (b) Vista da seção transversal na boca do canal.....	83
Figura 4.1 – Séries temporais de elevação da onda de maré resultantes do cálculo realizado pelo SisBaHiA nas estações B, C e D do canal proposto, Figura (3.15), e da imposição de elevação na fronteira aberta como uma condição de contorno de GST. Nesta simulação foi desprezada a planície de maré virtual. ....	87
Figura 4.2 – Séries temporais de elevação da onda de maré resultantes do cálculo realizado pelo SisBaHiA nas estações B, C e D do canal proposto, Figura (3.15), e da imposição de elevação na fronteira aberta como uma condição de contorno de GTV100. Nesta simulação foi utilizada uma planície de maré virtual de inclinação 1:100.....	88

Figura 4.3 – Séries temporais de elevação da onda de maré resultantes do cálculo realizado pelo SisBaHiA nas estações B, C e D do canal proposto, Figura (3.15), e da imposição de elevação na fronteira aberta como uma condição de contorno de GTV1000. Nesta simulação foi utilizada uma planície de maré virtual de inclinação 1:1000.....	89
Figura 4.4 – Séries temporais de elevação da onda de maré resultantes do cálculo realizado pelo SisBaHiA nas estações B, C e D do canal proposto, Figura (3.15), e da imposição de elevação na fronteira aberta como uma condição de contorno de GTV1000AD. Nesta simulação foi utilizada uma planície de maré virtual de inclinação 1:1000 e uma força de atrito na fronteira de terra 10 vezes superior à força de atrito no canal.....	91
Figura 4.8 – Sobreposição das séries temporais de velocidade longitudinal de Wu, Falconer e Struve (2001) e do SisBaHiA.....	93
Figura 4.9 – Séries temporais de velocidade longitudinal calculadas pelo SisBaHiA, nas estações espalhadas em GST.....	96
Figura 4.10 – Séries temporais de velocidade longitudinal calculados pelo SisBaHiA, nas estações espalhadas em GTV100.....	98
Figura 4.11 – Séries temporais de velocidade longitudinal calculados pelo SisBaHiA, nas estações espalhadas em GTV1000.....	99
Figura 4.12 – Séries temporais de velocidade longitudinal calculados pelo SisBaHiA, nas estações espalhadas em GTV1000AD.....	101

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Significado da simbologia utilizada na grade de Richardson.....	34
Tabela 2.2 – Significado dos termos utilizados na formulação matemática que representa a condição de escoamento na porta de uma célula. ....	35
Tabela 2.3 – Parâmetros utilizados na opção de pântano. ....	43
Tabela 2.4 – Relacionamento entre os parâmetros da opção de pântano, adaptado de Nielsen e Apelt (2003). ....	45
Tabela 3.1 – Significado físico dos termos da equação da continuidade, adaptado de Rosman et al. (2006). ....	54
Tabela 3.2 – Significado físico dos termos da equação da quantidade de movimento, adaptado de Rosman et al. (2006). ....	54
Tabela 3.3 – Descrição das variáveis físicas das equações da continuidade e da quantidade de movimento. ....	55
Tabela 3.4 – Parâmetros utilizados nas simulações 1 e 2, referentes à modelagem em G2.....	70
Tabela 3.5 – Parâmetros utilizados em GST, GTV100, GTV1000 e GTV1000AD....	78
Tabela 4.1 – Velocidades longitudinais máximas calculadas pelo SisBaHiA nas estações de GST. Os valores indicados na tabela são aproximados..	97

Tabela 4.2 – Velocidades longitudinais máximas calculadas pelo SisBaHiA nas estações de GTV100. Os valores indicados na tabela são aproximados.....	98
Tabela 4.3 – Velocidades longitudinais máximas calculadas pelo SisBaHiA nas estações de GTV1000. Os valores indicados na tabela são aproximados.....	100
Tabela 4.4 – Velocidades longitudinais máximas calculadas pelo SisBaHiA nas estações de GTV1000AD. Os valores indicados na tabela são aproximados.....	101

## LISTA DE SIMBOLOS

$B$	Índice usado para indicar superfície de fundo
$g$	Aceleração da gravidade
$h$	Profundidade da água abaixo do nível de referência
$H$	Profundidade total da água
$s$	Índice usado para indicar superfície livre
$t$	Tempo
$U$	Componente da velocidade na direção x
$V$	Componente da velocidade na direção y
$x, y$	Coordenadas cartesianas
$\Phi$	Velocidade de rotação angular da Terra
$\theta$	Ângulo de latitude
$\rho_0$	Densidade da partícula
$\bar{\tau}_{xx}$	Componente da tensão de Reynolds na direção x atuando em um plano perpendicular a x
$\bar{\tau}_{xy}$	Componente da tensão de Reynolds na direção x atuando em um plano perpendicular a y
$\bar{\tau}_{yx}$	Componente da tensão de Reynolds na direção y atuando em um plano perpendicular a x
$\bar{\tau}_{yy}$	Componente da tensão de Reynolds na direção y atuando em um plano perpendicular a y
$\tau_x^B$	Componente da tensão de atrito no fundo na direção x



$\tau_y^B$	Componente da tensão de atrito no fundo na direção y
$\tau_x^S$	Componente da tensão de atrito devido ao vento na superfície livre, na direção x
$\tau_y^S$	Componente da tensão de atrito devido ao vento na superfície livre, na direção y
$\zeta$	Elevação ou cota da superfície livre acima do nível de referência

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS .....</b>	<b>23</b>
1.1. OBJETIVO GERAL.....	25
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	25
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>27</b>
2.1. MODELAGEM MATEMÁTICA .....	27
2.2. MODELAGEM NUMÉRICA .....	28
2.3. CONSIDERAÇÕES SOBRE MALHAS EM CONTORNOS MÓVEIS .....	30
2.4. ALAGAMENTO E SECAMENTO SOBRE GEOMETRIAS COMPLEXAS.....	32
2.4.1. Leclerc et al. (1990).....	33
2.4.2. George e Stripling (1995) .....	33
2.4.3. Balzano (1998) .....	39
2.4.4. Tchamen e Kahawita (1998) .....	40
2.4.5. Bates (2000).....	40
2.4.6. Heniche et al. (2000) .....	40
2.4.7. Wu, Falconer e Struve (2001) .....	41
2.4.8. Horritt (2002) .....	41
2.4.9. Quecedo e Pastor (2002) .....	42
2.4.10. Nielsen e Apelt (2003) .....	42
2.4.11. Oey (2005) .....	46
2.4.12. Rigo e Chacaltana (2006).....	46
2.5. DEFORMAÇÃO DA ONDA DE MARÉ .....	47
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>51</b>
3.1. O MODELO COMPUTACIONAL SISBAHIA .....	51
3.2. EQUAÇÕES DIFERENCIAIS PARCIAIS GOVERNANTES .....	52
3.3. A MALHA COMPUTACIONAL NO SISBAHIA.....	56
3.4. AS CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO NO SISBAHIA.....	58
3.4.1. As condições iniciais .....	58
3.4.2. As condições de contorno .....	59
3.5. OS MECANISMOS DE ALAGAMENTO E SECAMENTO DO SISBAHIA.....	60

3.5.1.	Alagamento e secamento real de planícies de maré.....	60
3.5.2.	Alagamento e secamento virtual de planícies de maré .....	61
3.6.	A OPÇÃO PELO ALAGAMENTO E SECAMENTO VIRTUAL DO SISBAHIA .....	63
3.6.1.	Aperfeiçoamento do mecanismo de alagamento/secamento virtual.....	64
3.6.2.	Avaliação do mecanismo de alagamento e secamento real.....	64
3.6.3.	Opção pelo mecanismo de alagamento e secamento virtual .....	75
3.7.	METODOLOGIA PARA AVALIAR O MECANISMO DE ALAG./SEC. VIRTUAL .....	77
3.8.	A QUALIDADE DO MECANISMO DE ALAG./SEC. VIRTUAL .....	79
3.9.	O EXPERIMENTO NUMÉRICO DE WU, FALCONER E STRUVE (2001) .....	80
3.10.	METODOLOGIA P/ COMPARAR O MECANISMO DE ALAG./SEC. VIRTUAL .....	82
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>86</b>
4.1.	AVALIAÇÃO DO MECANISMO DE ALAGAMENTO E SECAMENTO VIRTUAL .....	86
4.1.1.	O resultado da simulação em GST.....	87
4.1.2.	O resultado da simulação em GTV100.....	88
4.1.3.	O resultado da simulação em GTV1000.....	89
4.1.4.	O resultado da simulação em GTV1000AD.....	90
4.1.5.	Análise dos resultados do mecanismo de alag./sec. virtual .....	92
4.2.	COMPARAÇÃO DO MECANISMO DE ALAG./SEC. VIRTUAL .....	93
4.3.	A INFLUÊNCIA DO ALAGAMENTO E SECAMENTO NA ONDA DE MARÉ.....	95
4.3.1.	Discussão dos resultados da avaliação do mecanismo virtual.....	96
4.3.1.1.	A onda de maré no canal de GST .....	96
4.3.1.2.	A onda de maré no canal de GTV100 .....	97
4.3.1.3.	A onda de maré no canal de GTV1000 .....	99
4.3.1.4.	A onda de maré no canal de GTV1000AD .....	100
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>104</b>
5.1.	CONCLUSÕES .....	104
5.2.	RECOMENDAÇÕES .....	105
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>107</b>

## RESUMO

Esta dissertação apresenta a avaliação de dois mecanismos de alagamento e secamento, real e virtual, para regiões de estreitos canais de maré ladeados por extensas planícies de maré, onde o comportamento da onda de maré é modificado devido à sua interação com a complexa geometria descrita.

Um modelo computacional bidimensional na horizontal (2DH), promediado na vertical, foi utilizado nesta investigação. Este modelo baseia-se no método dos elementos finitos.

Algumas simulações indicam a aplicabilidade do modelo às regiões de planícies de maré sujeitas ao processo de alagamento e secamento, apontando bons resultados. A técnica virtual do modelo também foi comparada numericamente a um experimento numérico, apresentando uma boa concordância entre os resultados.

**Palavras chaves:** Alagamento e Secamento; Assimetria da Maré; Elementos Finitos; Escoamento de Águas Rasas; Escoamento de Superfície Livre; Planícies de Maré;

## ABSTRACT

In this thesis, two mechanisms of wetting and drying are analysed, real and virtual, for regions of narrow tidal creeks rounded for extensive tidal flats, where the behavior of the tidal wave is modified by its interaction with the complex geometry described.

A two-dimensional horizontal computational model (2DH), vertically integrated, was used in this investigation. This model is based on the finite elements method.

Some simulations show the potentialities of the model on tidal flats subject to wetting and drying, showing good results. The virtual technique of the model was also compared to a numeric experiment, showing a good agreement between the results.

**Keywords:** Finite Elements; Free Surface Flow; Shallow Water Flow; Tidal Asymmetry; Tidal Flat; Wetting and Drying.

---

## Capítulo 1

### INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

## 1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

As regiões costeiras são áreas atrativas ao desenvolvimento e à desenfreada ocupação humana decorrente do caos urbano instalado, principalmente, nos grandes centros, onde a atividade antrópica tornou-se sinônimo de desordem ambiental implicando em graves problemas ambientais. A ocupação desorganizada das zonas costeiras e o mau uso dos recursos hídricos, tais como o lançamento irracional de efluentes no corpo d'água, ameaçam a sustentabilidade dos ecossistemas naturais e influenciam diretamente a sociedade.

Os corpos d'água costeiros abrigam, entre outros, os estuários, os quais desempenham um importante papel na preservação das biodiversidades que se desenvolvem neste ecossistema e na conservação e drenagem de canais, permitindo a exploração antrópica.

Aliado aos interesses sócio-econômicos ligados aos recursos hídricos, surge a necessidade de se conhecer e entender os diversos processos físicos inerentes aos corpos d'água costeiros e estuarinos com o propósito de antever riscos e danos ambientais e intervir a fim de evitar ou minimizar as conseqüências ao meio ambiente.

Segundo Rigo (2004), em relação à gestão da qualidade das águas costeiras e estuarinas, a hidrodinâmica é um dos processos físicos preponderantes. E, particularmente, em estuários, a hidrodinâmica é bastante complexa, principalmente sobre canais envoltos por extensas planícies de maré que sofrem forte influência do escoamento proveniente dessas áreas laterais sujeitas ao processo de alagamento e secamento.

Mediante à necessidade de se conhecer e entender tais processos físicos como a hidrodinâmica, nas últimas décadas, poderosas ferramentas computacionais têm sido desenvolvidas, principalmente após o barateamento e o aumento da capacidade de processamento e armazenamento dos computadores.

E assim a modelagem computacional tem se tornado uma importante ferramenta para estudos ambientais tal como a determinação da hidrodinâmica de complexos

sistemas tais como estuários com alagamento e secamento de extensas planícies de maré.

A circulação hidrodinâmica pode ser modelada numericamente a partir de um modelo matemático, que expressa leis e princípios em termos de equações diferenciais e condições de contorno. Em geral, um sistema de equações matemáticas tridimensionais descreve a circulação hidrodinâmica de um corpo d'água, mas segundo Falconer (1976) é aceitável a utilização de modelos promediados na vertical (2DH) se há predominância horizontal do escoamento e a estratificação do corpo d'água é insignificante.

O trabalho de Rigo (2004) em regiões de extensas planícies de maré sinaliza a necessidade de mecanismos de alagamento/secamento de tais regiões em um modelo hidrodinâmico 2DH que utilize elementos finitos, capaz de representar o efeito do escoamento proveniente do volume armazenado lateralmente nessas áreas alagáveis sobre os estreitos canais de maré.

Nesta pesquisa propõe-se avaliar o funcionamento de dois mecanismos de alagamento e secamento de extensas planícies de maré de um modelo 2DH, baseado em elementos finitos, para o caso particular de um estreito canal margeado por extensas planícies de maré. Para tanto, não são modeladas as correntes de maré nos platôs, mas sim no canal principal do sistema de escoamento. Estes mecanismos podem considerar um domínio computacional incluindo a planície de maré de forma real ou virtual.

Assim, foram apresentados os objetivos do presente trabalho no capítulo 1. A revisão bibliográfica realizada para o desenvolvimento desta pesquisa é apresentada no Capítulo 2. A metodologia desenvolvida para avaliar os mecanismos de alagamento/secamento real e virtual, e comparar o mecanismo virtual, é apresentada no Capítulo 3, cujos resultados e discussão do caso real e virtual são apresentados, respectivamente, nos Capítulos 3 e 4 e as conclusões e recomendações no Capítulo 5.



## **1.1. OBJETIVO GERAL**

- ✓ Contribuir para o entendimento da influência do alagamento e secamento de planícies de maré na hidrodinâmica de canais de maré utilizando modelos numéricos baseados em elementos finitos.

## **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ✓ Avaliar o comportamento da onda de maré predito pelo mecanismo de alagamento /secamento real do modelo computacional SisBaHiA;
- ✓ Avaliar o comportamento da onda de maré predito pelo mecanismo de alagamento/secamento virtual do modelo computacional SisBaHiA;
- ✓ Comparar o mecanismo de alagamento e secamento virtual de planícies de maré do SISBAHIA;

---

## **Capítulo 2**

# **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apresentaremos neste capítulo a revisão de literatura que serve de sustentação à elaboração desta dissertação. Na primeira seção é abordada a modelagem matemática empregada na descrição dos fenômenos naturais intrínsecos a corpos d'água. Na segunda seção é descrita a modelagem numérica como ferramenta computacional necessária à reprodução da física modelada matematicamente. Na terceira seção são apresentadas algumas considerações sobre as malhas utilizadas para representar a batimetria de geometrias complexas que estão sob o efeito de alagamento e secamento em domínios discretizados a partir do método dos elementos finitos. Na quarta seção são revelados os estudos de vários autores sobre processos de alagamento e secamento na modelagem hidrodinâmica de regiões de geometria complexa. E na quinta, e última, seção são referenciados os estudos de pesquisadores em relação à assimetria da onda em canais de maré ocasionada devido à fricção induzida pelas planícies de maré sujeitas à dinâmica de alagamento e secamento.

### 2.1. MODELAGEM MATEMÁTICA

A modelagem matemática de regiões costeiras e estuarinas têm por finalidade a descrição de processos físicos tal como a hidrodinâmica desses corpos d'água através de equações diferenciais parciais (EDP's) que governam o escoamento. Tais equações empregam em sua formulação os princípios físicos baseados na conservação do volume (continuidade) e na conservação do momentum ou da quantidade de movimento (2ª Lei do movimento de Newton).

Segundo Rosman (1989) essas equações não apresentam solução analítica devido à complexidade da geometria, porém, são resolvíveis via métodos numéricos. Na engenharia, o método das diferenças finitas e dos elementos finitos são os mais usuais. Esses métodos baseiam-se no processo de discretização das EDP's governantes a fim de reduzir o problema físico contínuo a um problema discreto de modo que tais equações passam a ser avaliadas em cada ponto de uma malha

computacional que é utilizada por um modelo computacional para representar a região que se pretende estudar.

As EDP's em questão são capazes de descrever fenômenos físicos tridimensionais, mas para efeitos computacionais nem sempre são relevantes, principalmente, para os casos de pequenas lâminas d'água de escoamento que em geral se utiliza um modelo bidimensional integrado na vertical. Segundo Falconer (1976), é aceitável a utilização de modelos promediados na vertical quando há predominância horizontal dos fluxos de quantidade de movimento e é insignificante a estratificação do corpo d'água a ser estudado. Para que a solução dessas equações matemáticas seja única num determinado domínio é necessário, ainda, prescrever condições de contorno às mesmas. Em regiões costeiras, estas condições apontam à especificação de componentes de velocidades normais através da fronteira fechada e a imposição de elevação de maré ou de fluxo (velocidades ou vazão) através de fronteiras abertas.

## **2.2. MODELAGEM NUMÉRICA**

A representação de fenômenos físicos intrínsecos a corpos d'água naturais, visando a modelagem hidrodinâmica em sistemas de escoamento de superfície livre, são realizadas cada vez mais a partir da utilização de modelos. Estes modelos podem ser físicos, matemáticos, numéricos ou analógicos.

No caso de modelos físicos, são reproduzidos em escala reduzida, modelos conceptuais de fenômenos de interesse, denominados protótipos. Para tanto é considerada a hipótese de semelhança entre os fenômenos nas diferentes escalas.

Embora a modelagem física tenha sido amplamente utilizada até meados dos anos 70 o seu uso representa custos muito elevados quando aplicada às regiões costeiras devido à exigência de recursos laboratoriais, equipamentos sofisticados e muitos profissionais especializados. Assim a sua substituição por modelos numéricos foi inevitável com o surgimento de computadores cada vez mais capazes, já que tais modelos são incomparavelmente mais baratos e eficientes.

No caso de modelos matemáticos, a sua utilização consiste em traduzir em linguagem matemática o modelo conceptual do fenómeno de interesse. A representação da hidrodinâmica em corpos d'água naturais é baseada em 'leis' e 'princípios' expressos em termos de equações diferenciais e condições de contorno adequadas.

Tais equações são solucionadas através de uma aproximação numérica que visa reduzir o problema físico contínuo a um problema discreto e a essa prática se denomina modelagem numérica.

Praticamente qualquer modelo matemático pode ser resolvido através de um modelo numérico, e em geral há relativamente pouca perda de informação na tradução de um para o outro (ROSMAN et al., 2006).

Dependendo da possibilidade de resolução o modelo matemático pode ser resolvido a partir da analogia de modelos distintos, tal como a analogia entre um circuito hidráulico e um circuito elétrico. A este processo se denomina modelagem analógica e a sua utilização se dá apenas em casos muito particulares e num âmbito mais académico do que prático.

Os modelos numéricos permitem a solução de uma gama de problemas muitíssimo mais abrangente que qualquer outra modalidade de modelos (ROSMAN et al., 2006).

Dentre os métodos clássicos utilizados na modelagem numérica podemos destacar o das diferenças finitas, dos elementos finitos e dos volumes finitos. Neles o domínio da geometria a ser estudado é representado por uma malha ou grade computacional, compostas por células ou elementos que são constituídas por nós onde as variáveis dependentes das EDP's governantes, discretizadas, são avaliadas.

Um domínio computacional é constituído de contornos (fronteiras), sendo estes abertos<sup>1</sup> ou fechados<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Num domínio de modelagem, contornos abertos representam limites do domínio, tal como a entrada de uma baía ou estuário, e não um contorno físico.

<sup>2</sup> Os contornos fechados são também denominados contornos de terra e representam margens e seções de rios ou canais que estejam incluídos no domínio de modelagem.

A prescrição das condições de contorno impõe solução única às equações matemáticas para dado domínio.

Segundo Pacheco (2004) uma malha é classificada em função da sua formação. A malha será estruturada (uniforme ou não-uniforme) caso siga uma regra de formação e não-estruturada em caso contrário. A primeira é mais indicada nas situações de contornos regulares e a segunda nos casos de contornos irregulares.

Os elementos podem ser triangulares, retangulares, quadrados, e etc. O seu uso varia de acordo com a técnica numérica empregada na modelagem, podendo até ser usada de maneira mesclada numa mesma malha computacional, como é o caso dos elementos finitos em que é comum encontrar elementos triangulares e quadrangulares.

Todavia, ainda existem certas limitações ao uso de modelos numéricos de hidrodinâmica e de qualidade de água. Dentre estas podemos citar: dificuldades em se equacionar os efeitos de turbulência e do atrito devido à rugosidade do fundo em escoamentos não permanentes e não uniformes (ROCHA, 2000) e, segundo Bates (2000), dificuldades em simular os processos de alagamento e secamento. As condições de contorno incluídas nos estudos são freqüentemente imprecisas e limitadas. Assim, torna-se imprescindível a apreciação das limitações e restrições dos modelos numéricos, afim de que os resultados obtidos das simulações não levem a interpretações errôneas do sistema estudado (ROCHA, 2000).

### **2.3. CONSIDERAÇÕES SOBRE MALHAS EM CONTORNOS MÓVEIS**

As regiões sujeitas ao processo de alagamento e secamento são áreas de escoamento hidrodinâmico de águas rasas que envolvem mudanças na posição do contorno do fluido, tais como planícies de maré e inundações costeiras. Para representar essa dinâmica de contornos móveis, computacionalmente, é necessária a utilização de uma malha móvel ou fixa para que através dela as variáveis do equacionamento matemático governante possam ser avaliadas pelo modelo computacional.

Bates e Hervouet (1999), por exemplo, utilizaram uma grade numérica fixa para representar contornos móveis na hidrodinâmica de águas rasas.

Segundo Nielsen e Apelt (2003) um ‘algoritmo de malha ajustável’ usa uma malha móvel, já os algoritmos de ‘malha redutível’ e de ‘fissura’ usam uma malha fixa.

No caso do ‘algoritmo de malha ajustável’, o contorno se move com posicionamento preciso para representar a superfície molhada, mas pode requerer um grande esforço computacional, tornar-se numericamente instável, ter elementos alongados demais dependendo da variação da linha de costa e, além disso, não há clareza sobre seu funcionamento em planícies de maré.

Já no caso do ‘algoritmo de malha redutível’, apenas os elementos e nós da grade são desligados temporariamente, mantendo-se invariáveis suas respectivas localizações. São amplamente usados, em comparação ao anterior, são mais estáveis e mais simples, porém, no caso de modelos baseados em elementos finitos pode experimentar instabilidade devido ao possível surgimento de um contorno irregular que resultaria da retirada de uma célula do domínio.

E, finalmente, no algoritmo de ‘fissura’ ao invés dos elementos e dos nós secos serem removidos do domínio, estes entram num domínio de capacidade de escoamento reduzido, geralmente representado conceitualmente por uma fissura (zona subterrânea de baixa porosidade). Ou seja, ocorrendo o secamento dos nós de um elemento da malha o escoamento continua a um nível subterrâneo e a profundidade d’água neste domínio de escoamento é parametrizada e transformada numa profundidade d’água positiva.

Em modelos de elementos finitos isto elimina a má formação dos contornos, melhora a estabilidade global da solução, conserva a continuidade do volume, porém, segundo Bates e Hervouet (1999), têm um efeito indireto no momentum e não se pode garantir a conservação do momentum.

Dada à relativa dificuldade do desenvolvimento das técnicas de malhas ajustáveis que se adaptam à evolução do escoamento, a maioria dos modelos hidrodinâmicos utiliza uma aproximação de malha fixa e usam um algoritmo de correção para o escoamento sobre elementos parcialmente molhados (BATES, 2000).

Na modelagem hidrodinâmica de rios e estuários é importante termos uma aproximação robusta capaz de reproduzir as fronteiras móveis, que são contornos que separam as áreas secas e molhadas (HENICHE et al., 2000).

## **2.4. ALAGAMENTO E SECAMENTO SOBRE GEOMETRIAS COMPLEXAS**

São abordados nesta seção alguns estudos referentes à hidrodinâmica de regiões costeiras e estuarinas sob efeito de alagamento e secamento de planícies de maré, encontrados na literatura.

Nas duas últimas décadas os algoritmos numéricos avançaram e o aumento da capacidade de armazenamento e velocidade de processamento dos computadores levou ao desenvolvimento de modelos hidrodinâmicos de alta resolução para uma variedade de problemas de escoamento em águas rasas (BATES, 2000), porém segundo Ji; Morton e Hamrick (2001) para o caso de sistemas estuarinos sujeitos aos processos de alagamento e secamento tais modelos numéricos precisam ser capazes de estimar essas dinâmicas adequadamente.

O sistema de equações de águas rasas não-lineares utilizado em modelos hidrodinâmicos é uma aproximação útil para o estudo de dinâmicas de estuário, e de propagação de maré, porém segundo Quecedo e Pastor (2002) uma das maiores questões relacionadas à resolução desses tipos de problemas é o tratamento de áreas que alagam e secam.

Embora muitas aproximações tenham alcançado sucessos significativos, segundo Bates (2000) o processo de alagamento e secamento é um dos problemas físicos que ainda continua sem solução sendo desafiador o seu adequado tratamento. Este autor ainda revela que um problema fundamental com o estudo de processos de alagamento e secamento é a falta de uma conveniente solução analítica.

Segundo Nielsen e Apelt (2003) vários métodos têm sido usados para simular alagamento e secamento em modelos hidrodinâmicos baseados em elementos finitos e, de acordo com Quecedo e Pastor (2002), os modelos promediados na vertical provêm uma alternativa que reduz o custo computacional.



Em corpos d'água costeiros e rasos tais como embaixamentos, estuários, lagunas e outros, que experimentam a oscilação da maré na superfície livre, as extensas áreas sujeitas ao alagamento e secamento, denominadas planícies de maré, podem ter a mesma ordem de magnitude das áreas constantemente submersas (FALCONER et al., 1986; CASULLI e CHENG, 1993; UMGIESSER et al., 1988, apud BALZANO, 1998). Diante disto e de acordo com Balzano (1998), a reprodução da cobertura/descobertura da planície de maré é uma importante característica dos modelos numéricos de escoamento de maré governados pelas equações de águas rasas.

#### **2.4.1. Leclerc et al. (1990)**

Leclerc et al. (1990) desenvolveram um modelo numérico bidimensional, baseado em elementos finitos, utilizando a aproximação de fronteira móvel em processos de escoamento com superfície livre para simular alagamento e secamento em estuários e rios utilizando as equações de águas rasas. O algoritmo deles utiliza elementos secos, parcialmente secos e molhados.

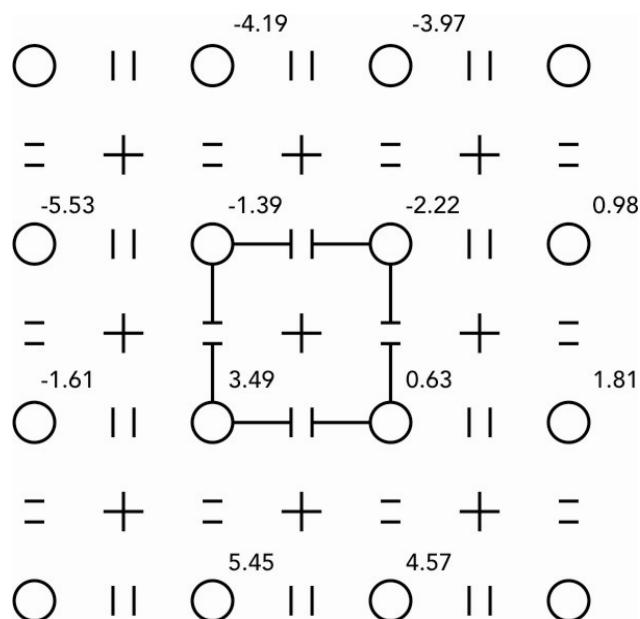
#### **2.4.2. George e Stripling (1995)**

Flather e Heaps (1975) desenvolveram uma técnica de alagamento e secamento utilizando uma grade computacional de Richardson, veja a Figura (2.1).

Nesta técnica a elevação do nível d'água é avaliada no centro de cada célula que compõe a grade de Richardson. A comunicação entre as células é realizada através dos pontos de escoamento situados nos lados das mesmas. Tais pontos funcionam como uma porta, permitindo a água entrar e sair da célula.

Assim, um ponto é considerado molhado se o nível d'água no ponto é mais alto que o nível do leito marinho naquele ponto.

A cada passo de tempo o algoritmo de Flather avalia se há ou não escoamento em cada ponto de escoamento da malha, isto é, verifica se cada porta está aberta ou fechada.



**Figura 2.1 – Grade de Richardson, adaptada de George e Stripling (1995).**

A simbologia que compõe a grade de Richardson é detalhada na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1 – Significado da simbologia utilizada na grade de Richardson.**

○	Nível do fundo do mar relativo a um datum fixo (m).
+	Elevação da superfície do mar relativa a um datum fixo.
=	Componente leste do fluxo de maré na profundidade média.
	Componente norte do fluxo de maré na profundidade média.

Nesta verificação pelo menos uma das condições a seguir deve ser satisfeita para que ocorra o escoamento entre células adjacentes:

- Dois pontos de elevação adjacentes estão molhados;
- Apenas um dos dois pontos de elevação adjacentes está molhado e o próprio ponto de escoamento está molhado, porém o nível d'água no ponto molhado deve ser no mínimo um valor crítico ' $\varepsilon$ ' superior ao nível no ponto seco;

Em termos das condições anteriormente descritas, uma porta sobre o lado norte de uma célula está aberta se:

$$(i) \quad \zeta_S > h_S \text{ e } \zeta_N > h_N$$

$$(ia) \quad \zeta_S > h_S \text{ e } \zeta_N \leq h_N \text{ e } \zeta_C > h_C \text{ e } \zeta_S - \zeta_N > \varepsilon$$

$$(iia) \quad \zeta_N > h_N \text{ e } \zeta_S \leq h_S \text{ e } \zeta_C > h_C \text{ e } \zeta_C - \zeta_S > \varepsilon$$

O significado dos termos utilizados em (i), (ia) e (iia) são dados na Tabela 2.2.

**Tabela 2.2 – Significado dos termos utilizados na formulação matemática que representa a condição de escoamento na porta de uma célula.**

$\varepsilon$	Espessura crítica do nível d'água.
$h$	Elevação do fundo do mar acima do mesmo datum.
$\zeta$	Elevação da superfície do mar acima de um datum fixo.
$C$	Abreviatura indicial de 'centro'.
$N$	Abreviatura indicial de 'norte'.
$S$	Abreviatura indicial de 'sul'.

Caso não ocorra o escoamento num determinado ponto, a sua apropriada componente de velocidade promediada na vertical é zerada. Mas, em caso contrário, tal velocidade é calculada pela equação do momentum.

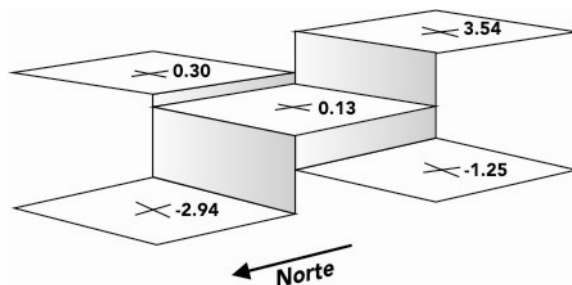
Flather e Hubbert (1991) aperfeiçoaram a técnica de Flather e Heaps ao permitir o alagamento e o secamento gradual das células do domínio. Para tanto, estes autores incluíram um 'fator de abertura' nas equações resultantes do momentum e um 'fator de área' na equação da continuidade.

O ‘fator de abertura’ e o ‘fator de área’ indicam a ‘fração molhada do lado de uma célula’ e a ‘fração molhada da área de uma célula’, respectivamente. Tais frações podem variar de 0 a 1.

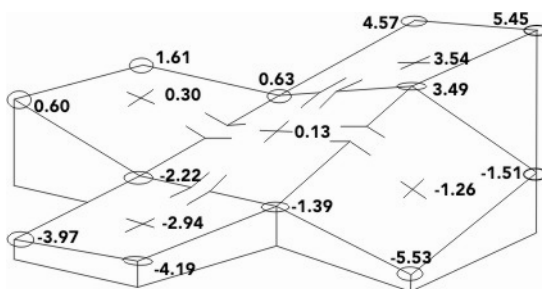
Embora estes autores recomendem a implementação desses fatores aliada a uma batimetria de fina escala na região de interesse, George e Stripling (1995) ao invés disso, utilizaram tais fatores aplicando o conceito das ‘facetas inclinadas’ aperfeiçoando o algoritmo de Flather e Hubbert.

Segundo George e Stripling (1995) em modelagens numéricas de planícies de maré, as células de uma malha relativamente grosseira podem secar completamente no estágio da baixa-mar e provocar falsos choques no modelo durante o processo de alagamento e secamento. Estes autores mostram que há maior possibilidade de eliminar tais choques ao representar a batimetria local, em cada célula, por uma faceta inclinada do que por um fundo plano (convencional).

As Figuras (2.2) e (2.3) ilustram, respectivamente, os esboços considerados nos conceitos de um fundo plano e de uma faceta inclinada.



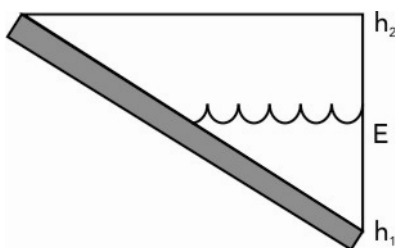
**Figura 2.2 – Células com fundo plano. Os números indicam as elevações acima do nível médio do mar (m), adaptada de George e Stripling (1991).**



**Figura 2.3 – Facetas inclinadas. Os números indicam as elevações acima do nível médio do mar (m), adaptada de George e Stripling (1991).**

### **Cálculo do fator de abertura para um fundo inclinado**

O cálculo do fator de abertura para um fundo inclinado depende da elevação da superfície do mar (considerada plana neste caso) no corte de uma célula e das alturas ' $h_1$ ' e ' $h_2$ ' do fundo do mar, acima de um datum fixo, nos extremos do corte da célula ( $h_1 < h_2$ ), veja a Figura (2.4).



**Figura 2.4 – Corte de uma célula com fundo inclinado, adaptado de George e Stripling (1991).**

Assim, são definidas três situações:

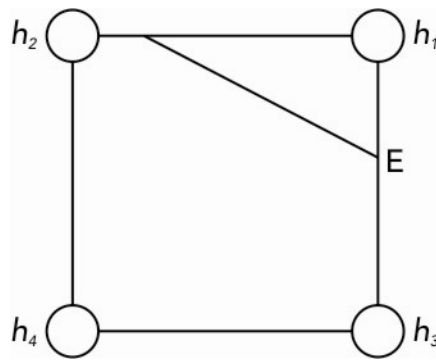
- ✓ Se  $\zeta < h_1$  (trivial), então o fator de abertura = 0;
- ✓ Se  $h_1 < \zeta < h_2$ , então o fator de abertura =  $\frac{E - h_1}{h_2 - h_1}$ ;
- ✓ Se  $h_2 < \zeta$  (trivial) então o fator de abertura = 1;

### **Cálculo do fator de área para um fundo inclinado**

O cálculo do fator de área para um fundo inclinado depende da elevação da superfície do mar dentro da célula e das alturas ' $h_1$ ', ' $h_2$ ', ' $h_3$ ' e ' $h_4$ ' do fundo do mar, acima de um datum fixo, situadas nos vértices de uma célula, onde  $h_1 < h_2 < h_3 < h_4$ .

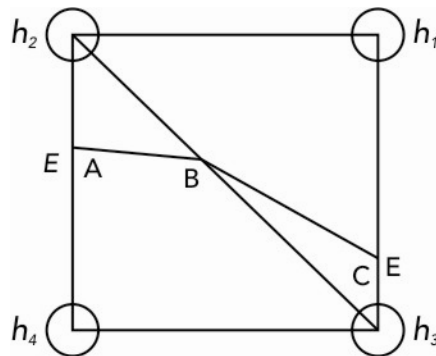
Assim, são definidas cinco situações:

- ✓ Se  $\zeta < h_1$  (trivial), então o fator de área = 0;
- ✓ Se  $h_1 < \zeta < h_2$ , então a área molhada de uma célula com fundo inclinado é representada pela Figura (2.5) e o fator de área =  $\frac{1}{2} \left( \frac{E - h_1}{h_2 - h_1} \right) \left( \frac{E - h_1}{h_3 - h_1} \right)$ ;



**Figura 2.5 – Área molhada de uma célula com fundo inclinado para o caso em que  $h_1 < \zeta < h_2$ , adaptado de George e Stripling (1991).**

- ✓ Se  $h_2 < \zeta < h_3$ , então a área molhada de uma célula com fundo inclinado é representada pela Figura (2.6) e o fator de área = (área  $\Delta h_1 h_2 h_3$  - área  $\Delta B C h_3$ ) + área  $\Delta h_2 A B$ ;



**Figura 2.6 – Área molhada de uma célula com fundo inclinado para o caso em que  $h_2 < \zeta < h_3$ , adaptado de George e Stripling (1991).**

Neste caso, de acordo com os autores, os vértices do triângulo são estabelecidos no sistema de coordenada local e a área dos triângulos é calculada a partir da fórmula de Heron.

- ✓ Se  $h_3 < \zeta < h_4$ , então a área molhada de uma célula com fundo inclinado é

$$\text{representada pela Figura (2.7) e o fator de área} = 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{h_4 - E}{h_4 - h_3} \right) \left( \frac{h_4 - E}{h_4 - h_2} \right);$$

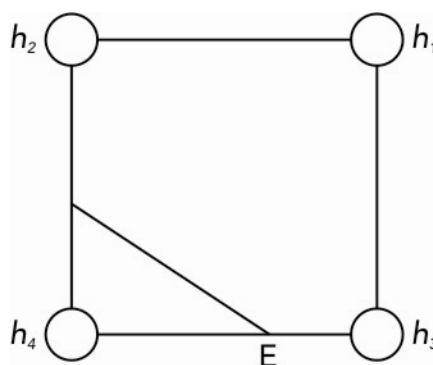


Figura 2.7 – Área molhada de uma célula com fundo inclinado para o caso em que  $h_3 < \zeta < h_4$ , adaptado de George e Stripling (1991).

- ✓ Se  $h_4 < \zeta$  (trivial), então o fator de área =1;

### 2.4.3. Balzano (1998)

Balzano (1998) revisou e avaliou dez métodos numéricos implícitos para simulação de alagamento e secamento em modelos de escoamento de águas rasas bidimensionais. Destes, sete são esquemas, já existentes, de alagamento e secamento para modelos baseados em diferenças finitas e três são novos. A técnica mais nova é a **VRS** (**V**ariable **R**etention **S**urface) e é similar àquela usada no código do **RMA2**, baseado em elementos finitos. Apesar de produzir uma solução mais precisa, sua limitação é o grande esforço computacional, pois se trata de um esquema não-linear e, por isso, requer iterações que podem ser impraticáveis. Em seu estudo as equações de águas rasas consideradas foram simplificadas por omitir as tensões de superfície induzidas pelo vento, a força de Coriolis e os termos difusivos.

Segundo o autor as dificuldades na modelagem numérica envolvendo processos de alagamento e secamento são:

- ✓ O modo de definir a profundidade média entre duas células;
- ✓ O critério de declaração de uma célula seca ou molhada;
- ✓ O modo de definir o volume de retenção na célula em função do nível d'água;

#### **2.4.4. Tchamen e Kahawita (1998)**

Tchamen e Kahawita (1998) utilizaram um esquema baseado em volumes finitos aplicando o solucionador de RIEMANN ao modelo bidimensional **Shallow Water Wave Model (2D SWWM)** para simular, numericamente, escoamentos de superfície livre que alagam e secam topografias complexas. Estes autores tentaram entender um pouco melhor a origem das instabilidades sofridas pela maioria dos esquemas tais como o das diferenças finitas e dos elementos finitos, sem o propósito de encontrar uma solução final, mas buscando considerações que possam revelar os ingredientes e a clareza necessária para o desenvolvimento futuro de soluções precisas. Este estudo foi concentrado na modelagem de situações em que parte do domínio inicialmente seco sofre inundação, ou vice-versa, como no caso de escoamentos sobre planícies de maré.

#### **2.4.5. Bates (2000)**

Bates (2000) desenvolveu uma nova aproximação adicionando uma reformulação da equação da continuidade - desenvolvida por Defina et al. (1994) para tratar elementos parcialmente molhados - ao modelo bidimensional, generalizado e baseado em elementos finitos TELEMAC-2D (HERVOUET, 1993), para considerar a dinâmica de alagamento e secamento em águas rasas sobre grades numéricas fixas através de uma abordagem de escala de sub-grade.

#### **2.4.6. Heniche et al. (2000)**

Heniche et al. (2000) desenvolveram um novo modelo numérico, discretizando as equações governantes através do método dos elementos finitos, utilizando-o na simulação hidrodinâmica de escoamentos de superfície livre, bidimensionais, tais como em rios e estuários, a fim de prever a posição da fronteira móvel que distingue a área seca da área molhada. Esta nova técnica utiliza um esquema Euleriano implícito para a discretização temporal e uma malha fixa com elementos triangulares para discretização espacial do modelo matemático, considera ainda, um conceito de porosidade para diferenciar a área seca da molhada. Afirmam que a aplicação desta nova aproximação em canais abertos complexos é dedicada, entre outras coisas, à análise de inundações extremas e da propagação da onda de maré.



O algoritmo desses autores consideram os contornos naturais do escoamento, definidos pelas linhas de contorno de profundidade zero, com uma nova aproximação que aceita valores positivos e negativos para a profundidade d'água. Assim uma área está molhada ou seca quando a profundidade d'água é, respectivamente, positiva ou negativa.

#### **2.4.7. Wu, Falconer e Struve (2001)**

Wu, Falconer e Struve (2001) a partir do refinamento do DIVAST - um modelo matemático bidimensional promediado na vertical - investigaram a influência das árvores de manguezal sobre a estrutura do escoamento em estuários, comparando perfis de velocidade na seção transversal de uma linha de costa reta, frangeada por manguezal inundável, estudada anteriormente por Mazda et al. (1995), idealizada e sob o efeito do regime de maré. Para tanto as simulações dos processos de alagamento e secamento foram realizadas usando um esquema, detalhado por Falconer e Chen, 1991. Nestas considerou-se a presença de vegetação de variados diâmetros e densidades, assim como, num caso extremo, a sua completa remoção da planície de maré. Segundo os autores, as equações hidrodinâmicas bidimensionais que descrevem escoamentos de águas costeiras e estuarinas são, geralmente, baseadas nas equações de Reynolds tridimensionais integradas na vertical para fluxos incompressíveis e turbulentos e incluem os efeitos de rotação da terra, de fricção do fundo e das tensões do vento.

#### **2.4.8. Horritt (2002)**

Horritt (2002) utilizou o TELEMAC 2D, um modelo de escoamento de águas rasas, bidimensional, baseado em elementos finitos, para avaliar três métodos que tratam elementos parcialmente molhados, noutras palavras, fronteiras móveis sobre malhas fixas. Esses algoritmos de alagamento e secamento foram testados a partir do uso de uma solução numérica unidimensional do problema de inundação de uma praia plana, mas de acordo com o autor a avaliação do desempenho dessas técnicas e a comparação dos diferentes esquemas são difíceis devido à complexidade do ambiente natural e a escassez de dados de validação de alta qualidade.

### 2.4.9. Quecedo e Pastor (2002)

Quecedo e Pastor (2002) mostram como as formulações clássicas baseadas em elementos finitos, como Taylor-Galerkin podem ser aplicadas para simular áreas de alagamento e secamento em problemas de choques com alta velocidade, como no caso especial das ondas de inundações catastróficas.

### 2.4.10. Nielsen e Apelt (2003)

Nielsen e Apelt (2003) investigaram o efeito da variação dos parâmetros da porosidade de pântano no desempenho do modelo hidrodinâmico bidimensional RMA2, baseado em elementos finitos, em situações em que ocorre a inundação de áreas inicialmente secas, tais como planícies de maré. Estes autores utilizaram o método da porosidade de pântano, que é um tipo de algoritmo de alagamento e secamento de 'fissura'. Em tal estudo foram realizadas comparações a exemplos simples e a cálculos teóricos.

A esquematização do método de fissura padrão é mostrada na Figura (2.8 a). Neste esquema os elementos e nós secos da malha nunca são removidos do domínio computacional, ao invés disso, estes entram num domínio de capacidade de escoamento reduzido (zona subterrânea de baixa porosidade).

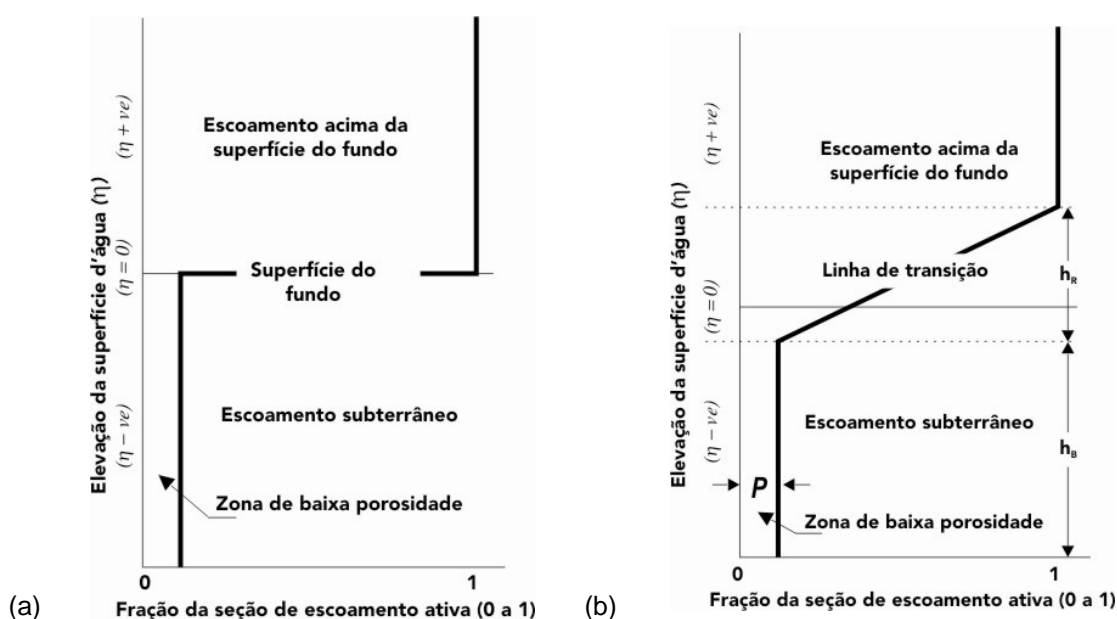


Figura 2.8 – (a) Representação idealizada da mudança na seção de escoamento considerada no método de fissura padrão ; (b) Representação aproximada da mudança na seção de escoamento (com parâmetros da opção de pântano  $h_B$ ,  $h_R$  e  $P$ ) considerada na opção de pântano; adaptada de Nielsen e Apelt (2003).

Neste caso a redução na capacidade de escoamento ocorre sobre todo o elemento e em ambas as direções de escoamento horizontal e a transição na porosidade entre o ‘escoamento acima da superfície do fundo’ e o ‘escoamento subterrâneo’ é imediata, o que é inaceitável em aplicações de modelagem numérica.

Segundo MacArthur (1990) o método da fissura geralmente requer a existência de uma região de transição gradual entre um elemento molhado escoando completamente e o outro totalmente seco com capacidade de escoamento reduzido.

Para satisfazer tal exigência foi utilizada a opção de pântano, cujo conceito considera uma zona de transição de redução de porosidade quando a profundidade d’água se aproxima de zero, veja a Figura (2.8 b).

Apenas a esquematização mostrada na Figura (2.8 b) não prediz o comportamento da opção de pântano, são necessários ainda os valores dos parâmetros  $h_{AT}$ ,  $h_{TP}$  (ou  $\eta_{AT}$  e  $\eta_{TP}$ ) e  $h_{TED}$  para indicar tal comportamento. A Tabela 2.3 apresenta os parâmetros utilizados pela opção de pântano com seus respectivos significados.

**Tabela 2.3 – Parâmetros utilizados na opção de pântano.**

$a$	Elevação de fundo (relativo ao datum especificado pelo usuário).
$h$	Profundidade.
$h_{AT}$	Profundidade de transição entre escoamento totalmente acima da superfície do fundo e escoamento de transição.
$h_B$	Elevação modificada do fundo no domínio de escoamento de pântano.
$h_R$	Ordem da profundidade de transição sobre a qual a seção rebaixa-se de escoamento completamente acima da superfície do fundo para escoamento de pântano ou subterrâneo.
$h_{TED}$	Profundidade equivalente transformada.
$h_{TP}$	Profundidade de transição entre escoamento de transição e escoamento subterrâneo de baixa porosidade.

$P$	Mínima fração ativa na zona subterrânea de baixa porosidade.
$\eta$	Nível d'água.
$\eta_{AT}$	Nível d'água de transição (relativo ao nível do leito original) entre escoamento totalmente acima da superfície e escoamento de transição.
$\eta_{TP}$	Nível d'água de transição (relativo ao nível do leito original) entre escoamento de transição e escoamento subterrâneo de baixa porosidade.

Os termos ' $h_B$ ,  $h_R$  e  $P$ ' são os parâmetros de entrada da opção de pântano. A esquematização deles é apresentada na Figura (2.8 b).

Os níveis d'água  $\eta_{TP}$ ,  $\eta_{AT}$  e as profundidades d'água  $h_{TP}$ ,  $h_{AT}$  em cada nó de um elemento com um nível de fundo uniforme ( $a$ ) são determinados pelas equações:

$$\eta_{TP} = a - \frac{h_R}{2} + \left( h_B + \frac{h_R}{2} \right) \left( \frac{P}{1-P} \right) \quad (1) \quad \eta_{AT} = \eta_{TP} + h_R \quad (2)$$

$$h_{TP} = h_B + \left( h_B + \frac{h_R}{2} \right) \left( \frac{P}{1-P} \right) \quad (3) \quad h_{AT} = h_{TP} + h_R \quad (4)$$

Durante a simulação numérica o modelo transforma a profundidade d'água numa 'profundidade equivalente transformada ( $h_{TED}$ )' para incorporar as mudanças na capacidade de armazenamento de volume ao serem consideradas as zonas subterrânea de baixa porosidade e de transição.

Na realidade tal transformação na profundidade aponta que o nível d'água nunca descera abaixo do nível do fundo, pois as profundidades d'água utilizadas nas simulações serão sempre positivas. A determinação de  $h_{TED}$  depende do nível d'água ( $\eta$ ) e é obtida a partir das equações:

$$\text{Se } \eta > \eta_{AT}, \quad h_{TED} = P \left( \eta - a + h_B + \frac{h_R}{2} \right) + (1-P) \left( \eta - \eta_{AT} + \frac{h_R}{2} \right) \quad (5)$$

(Domínio de escoamento acima da superfície do fundo)

$$\text{Se } \eta_{AT} > \eta > \eta_{TP}, \quad h_{TED} = P \left( \eta - a + h_B + \frac{h_R}{2} \right) + \frac{(1-P)}{2} \left( \frac{(\eta - \eta_{TP})^2}{h_R} \right) \quad (6)$$

(Domínio de escoamento de transição)

$$\text{Se } \eta < \eta_{TP}, \quad h_{TED} = P \left( \eta - a + h_B + \frac{h_R}{2} \right) \quad (7)$$

(Domínio de escoamento subterrâneo)

Segundo Nielsen e Apelt (2003), a seleção dos parâmetros de entrada  $h_B$ ,  $h_R$  e  $P$  deve ser considerada mais do ponto de vista da variação em  $h_{TED}$  do que em  $\eta_{AT}$  e  $\eta_{TP}$ . Para tanto tal seleção pode ser realizada a partir da Tabela 2.4, baseada na efetiva combinação deles sobre os parâmetros  $h_{AT}$ ,  $h_{TP}$  e  $h_{TED}$ .

**Tabela 2.4 – Relacionamento entre os parâmetros da opção de pântano, adaptado de Nielsen e Apelt (2003).**

Parâmetros de entrada (pântano)			Nível d'água nas transições do domínio de escoamento		Profundidade equivalente transformada nas transições do domínio de escoamento	
$h_B$ (m)	$h_R$ (m)	$P$	$\eta_{AT}$ (m)	$\eta_{TP}$ (m)	$(h_{TED})_{AT}$ (m)	$(h_{TED})_{TP}$ (m)
1,50	0,67	0,040	0,42	-0,25	0,41	0,06
2,50	0,67	0,040	0,45	-0,22	0,45	0,10
5,50	0,67	0,040	0,58	-0,09	0,58	0,23
8,50	0,67	0,040	0,70	0,03	0,70	0,35
1,50	0,67	0,005	0,34	-0,33	0,34	0,01
2,50	0,67	0,005	0,35	-0,32	0,35	0,01
5,50	0,67	0,005	0,36	-0,31	0,36	0,03
8,50	0,67	0,005	0,38	-0,29	0,38	0,04
1,50	0,05	0,040	0,09	0,04	0,09	0,06
2,50	0,05	0,040	0,13	0,08	0,13	0,10
5,50	0,05	0,040	0,26	0,21	0,26	0,23
8,50	0,05	0,040	0,38	0,33	0,38	0,35
1,50	0,05	0,005	0,03	-0,02	0,03	0,01
2,50	0,05	0,005	0,04	-0,01	0,04	0,01
5,50	0,05	0,005	0,05	0,00	0,05	0,03
8,50	0,05	0,005	0,07	0,02	0,07	0,04

Os valores padrões dos parâmetros de pântano recomendados por King (2000) são  $h_B = 1,5m$ ,  $h_R = 0,67m$  e  $P = 0,04$ .

Foi apontada nesta investigação que 'a seleção dos parâmetros da opção de pântano para problemas com alagamento e secamento não é tão simples quanto se poderia imaginar' (Nielsen e Apelt, 2003).

Estes autores descobriram que o método da porosidade de pântano é similar ao esquema 'VRS – Superfície de Retenção Variável' defendido por Balzano como aquele que produziu o melhor desempenho em suas avaliações.

#### **2.4.11. Oey (2005)**

Oey (2005) propôs a construção e aplicação de um esquema de alagamento e secamento (WAD) que trabalhe conjuntamente com o modelo oceânico **Princeton Ocean Model (POM)**; MELLOR, 2002) e amplie suas outras características existentes em regiões costeiras, onde os processos de alagamento e secamento possam predominar, constituindo assim o **POM-WAD**.

#### **2.4.12. Rigo e Chacaltana (2006)**

Rigo e Chacaltana (2006) avaliaram a influência do alagamento do manguezal na hidrodinâmica da Baía de Vitória, implementando e calibrando o modelo computacional DIVAST – **Depth-Integrated Velocities And Solute Transport** - (Falconer, 1976) para a região. Nele, as equações diferenciais parciais que governam o escoamento são resolvidas através do método numérico 'diferenças finitas' e a grade que representa a região a ser modelada é composta de células quadradas, o que às vezes pode ser uma limitação a uma boa representatividade de regiões de geometrias mais complexas. Os resultados deste estudo mostram a necessidade de uma melhor representação do domínio das áreas de manguezal ao modelar este tipo de escoamento.

Dentre os efeitos oriundos do processo de alagamento e secamento de planícies de maré é discutido nesta pesquisa o efeito da assimetria da onda de maré em canais de maré ocasionada devido à fricção induzida pelas planícies de maré sujeitas à dinâmica de alagamento e secamento. Assim, para embasar a discussão a respeito de tal efeito é apresentada na próxima seção uma revisão de literatura que trata tal assunto.

## 2.5. DEFORMAÇÃO DA ONDA DE MARÉ

Apresentaremos nesta seção alguns estudos referentes à assimetria da onda de maré ocasionada pela sua interação com geometrias complexas, sujeitas à dinâmica de alagamento e secamento nas planícies de maré, revistos na literatura.

O fenômeno da maré é gerado pelas forças de atração gravitacional da Lua e do Sol, associados à aceleração centrífuga, agindo diretamente sobre as grandes massas de água das bacias oceânicas (DYER, 1997).

De acordo com Dyer (1997) as ondas de maré astronômica variam na escala temporal em termos de horas e influenciam o comportamento hidrodinâmico dos estuários tanto em intensidade como em frequência de ocorrência. A sua influência propaga-se estuário acima e abaixo na forma de ondas longas de gravidade. As oscilações dessas marés têm períodos de ocorrência predominante semidiurno (12,4 horas) com frequência de duas oscilações por dia ou diurno com ciclo de apenas uma oscilação por dia. A maré também possui componentes quinzenais que são moduladas pelas fases da lua sendo que a altura na sizígia é maior do que na quadratura.

A oscilação da maré na entrada do estuário propaga-se estuário acima como uma onda de águas rasas, pois seu comprimento é muito grande se comparado com a profundidade local. Os movimentos horizontais associados às oscilações de maré são denominados correntes de maré.

A interação entre a onda de maré propagando-se estuário acima e a morfologia do estuário, é responsável por importantes variações na altura da maré e na intensidade das correntes (DYER, 1997).

Dyer (1997) explica que no estuário a onda de maré apresenta também oscilações harmônicas de curto período ocasionadas pela topografia local, pois a sua propagação é bloqueada pela descarga fluvial e, simultaneamente, ocorre a dissipação de energia devido ao atrito do fundo e das margens. Dessa forma, a onda de maré propagando-se estuário acima pode ser deformada.

A deformação da onda de maré ao se propagar no canal de uma região estuarina implica em mudanças nas correntes de maré ocasionando diferentes períodos de

duração de enchentes e vazantes. Dessa forma a assimetria da onda de maré ocasiona dominância de enchente ou de vazante.

Regiões típicas de escoamento de maré estão constantemente sendo estudadas por vários pesquisadores em todo o mundo. Tais estudiosos, geralmente, desenvolvem e/ou utilizam ferramentas computacionais, ou seja, modelos numéricos, com o propósito de investigar o comportamento hidrodinâmico do escoamento desenvolvido nessas áreas de complexa geometria. Alguns desses trabalhos encontrados na literatura são listados a seguir.

Wolanski, Jones e Bunt (1980) desenvolveram o 2DSWAMP, um modelo numérico bidimensional, para modelar canais de manguezal. Estes autores descobriram que canais de manguezal experimentaram uma assimetria na maré devido à fricção induzida pela vegetação de mangue atingida. Esta assimetria mantém a profundidade e navegabilidade do canal rodeado por ilhas arborizadas entre marés (manguezal).

Segundo Rigo (2004) a interação da maré com a geometria de regiões estuarinas com planícies de maré é responsável pela mudança no comportamento das correntes ao longo do ciclo de maré.

(Speer & Aubrey e Friedrichs et al. (1985, 1992)) apud Rigo (2004) investigaram o comportamento da onda de maré em manguezais e os seus resultados apontam que canais sem armazenamento entre-marés em baixios são enchente-dominantes, enquanto canais com armazenamento entre-marés grande o suficiente para suplantarem os efeitos da fricção no canal são vazante-dominantes. Assim, é necessário que exista um volume mínimo armazenado capaz de provocar a dominância de vazante em canais de manguezais.

Dronkers (1986) estudou o relacionamento entre a assimetria da maré e a morfologia estuarina. O autor (apud Rigo (2004)) indica, entre outras situações, os estuários pequenos com extensas planícies de maré onde as velocidades máximas seriam no fim da vazante, explicando que a onda de maré propaga-se mais rapidamente nos canais do que nas planícies de maré, portanto o abaixamento do nível d'água ocorre primeiro nos canais e, em seguida, na planície inundável, o que leva a uma declividade da linha d'água e correntes fortes durante o último estágio da vazante.



Estuários com canais relativamente fundos e grande armazenamento de água entre-marés usualmente apresentam dominância de vazante ((BOON & BYRNE, 1981; SPEER & AUBREY, 1985; DRONKERS, 1986) apud RIGO, 2004).

Do ponto de vista das correntes, a dominância de um ciclo de maré é considerada 'de enchente' quando as maiores velocidades são da enchente, e 'de vazante' com as maiores velocidades na vazante ((BOON & BYRNE, 1981; FRIEDRICHS & AUBREY, 1988) apud RIGO, 2004).

Wolanski et al. (1990) modificaram o modelo bidimensional promediado na vertical HYDRO (Falconer et al., 1986) com o propósito de avaliar as correntes no canal. Como o modelo não predisse o campo de velocidades na planície de manguezal, assumiram que o manguezal era uma área de armazenamento lateral e que a elevação do nível d'água no manguezal era horizontal na direção lateral e igual àquela da célula do canal principal. Mas, segundo Wu, Falconer e Struve (2001) esta última suposição é duvidosa, pois devido a grande resistência induzida pela vegetação de manguezal é comum aumentar localmente a inclinação da superfície d'água.

Rigo (2004) estudou o escoamento da região da Baía de Vitória, ES, Brasil, utilizando um modelo 2DH (DIVAST - sem efeito da vegetação) para investigar a influência do manguezal na hidrodinâmica da região. Seus resultados numéricos e experimentais apontam que:

- ✓ O manguezal tem um papel importante na deformação da onda de maré, propiciando a dominância das correntes de vazante;
- ✓ O volume armazenado no manguezal é determinante nesta dominância;

---

## **Capítulo 3**

# **MATERIAL E MÉTODOS**

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

A metodologia desenvolvida para avaliar os mecanismos de alagamento/secamento real e virtual de planícies de maré do SisBaHiA, é apresentada neste Capítulo.

A primeira seção apresenta o modelo computacional que é utilizado como ferramenta de pesquisa. A segunda seção mostra as equações de águas rasas que são utilizadas pelo modelo hidrodinâmico bidimensional '2DH' do SisBaHiA, para escoamentos de superfície livre. A terceira seção trata das condições iniciais e de contorno impostas no SisBaHiA, tendo em vista a unicidade da solução das equações matemáticas. A quarta seção revela o tipo de malha utilizada neste sistema, assim como, a sua composição e vantagens. A quinta seção comenta sobre os mecanismos de alagamento e secamento existentes no SisBaHiA. A sexta seção aponta a opção pelo alagamento e secamento virtual para investigar o comportamento da onda de maré no canal de maré, em função da avaliação dos resultados dos testes executados via mecanismo real. A sétima seção apresenta a metodologia para avaliar o mecanismo de alagamento e secamento virtual. A oitava seção explica sobre a necessidade de avaliar a técnica virtual a partir de um resultado numérico conhecido na literatura. A nona seção apresenta o experimento numérico de Wu, Falconer e Struve (2001) que servirá de baliza para fins de comparação do esquema proposto. E, finalmente, a décima e última seção apresentará a metodologia proposta para avaliar o mecanismo de alagamento e secamento virtual do modelo SisBaHiA, tendo como base o experimento apresentado na nona seção.

#### **3.1. O MODELO COMPUTACIONAL SISBAHIA**

De acordo com Rosman et al. (2006), o SisBaHiA é um sistema de modelos computacionais para previsão hidrodinâmica e também para a previsão da qualidade das águas ou transporte de grandezas escalares (modelos de dispersão) em corpos d'água naturais.

Este sistema oferece recursos para modelagem de corpos d'água (rios, canais, lagos, lagoas, reservatórios, estuários, baías e águas costeiras) com superfície livre sem estratificação vertical significativa. A atual versão 5.1 foi utilizada para o desenvolvimento desta pesquisa.

O modelo hidrodinâmico do SisBaHiA simula a circulação hidrodinâmica em corpos d'água rasos sob diferentes cenários e dispõe de dois módulos, sendo um tridimensional (3D) e outro promediado na vertical (2DH) mas, em geral, a simulação de campos de corrente promediada na vertical, bidimensional na horizontal (2DH), é adequada para o caso da modelagem de regiões estuarinas sem a presença de manguezal devido à pequena lâmina d'água do escoamento. Portanto, usaremos o módulo hidrodinâmico 2DH do modelo SisBaHiA para o desenvolvimento deste trabalho.

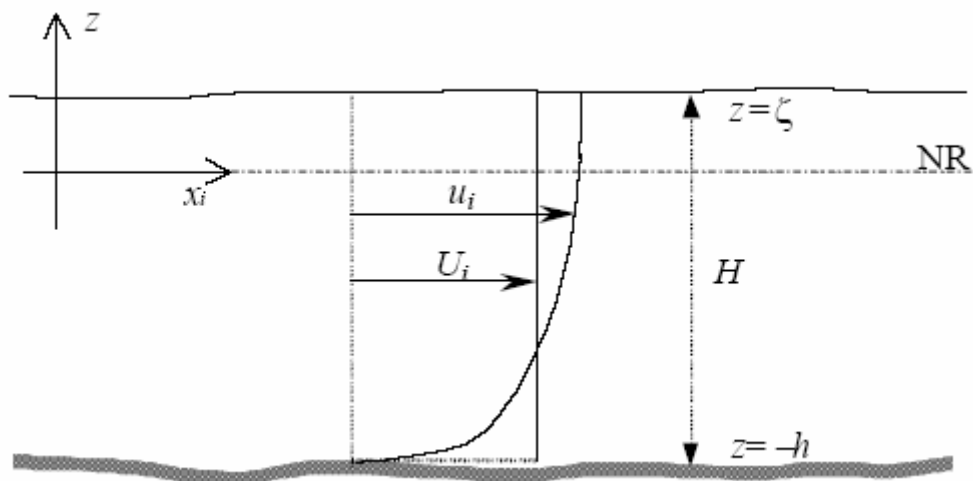
A modelagem numérica do processo de escoamento de um fluido consiste em tratar um problema de natureza complexa, descrita por EDP's contínuas em um problema discreto, através de métodos numéricos de discretização. O SisBaHiA emprega um método numérico baseado em elementos finitos.

As EDP's que representam os princípios físicos de Conservação da Continuidade e do Momento da Quantidade de Movimento no módulo hidrodinâmico 2DH, do SisBaHiA, são integradas na vertical, considerando as hipóteses de fluido incompressível, de pressão hidrostática, e de ondas longas, resultando nas equações de águas rasas. As equações resultantes, nas direções  $x$  e  $y$ , da quantidade de movimento consideram o efeito de Coriolis, as tensões provocadas pelo vento, o atrito com o fundo e as tensões turbulentas de Reynolds.

### **3.2. EQUAÇÕES DIFERENCIAIS PARCIAIS GOVERNANTES**

O módulo hidrodinâmico 2DH do SisBaHiA determina, a partir das três equações de águas rasas que regem os escoamentos de superfície livre, as três incógnitas  $(\zeta, U, V)$  que representam, respectivamente, as elevações da superfície livre e as componentes das velocidades médias na vertical, nas direções  $x$  e  $y$ .

A Figura (3.1) apresenta o sistema de coordenadas utilizado pelo SisBaHiA nas modelagens 3D e 2DH. A sigla ‘NR’ significa nível de referência. Para o caso 2DH a velocidade promediada na vertical é representada por  $U_i$ . As coordenadas  $x_i$  são  $(x_1, x_2) \equiv (x, y)$  e as velocidades horizontais são  $(u_1, u_2) \equiv (u, v)$ , onde o índice  $i = 1, 2$ .



**Figura 3.1 – Sistema de coordenadas utilizado pelo SisBaHiA tanto na modelagem 3D quanto na modelagem 2DH, sendo NR o nível de referência. No caso 2DH,  $U_i$ , representa a velocidade promediada na vertical. As coordenadas e velocidades horizontais são representadas como  $(x, y) \equiv (x_1, x_2)$  e  $(u, v) \equiv (u_1, u_2)$  utilizando o índice  $i = 1, 2$ , adaptado de Rosman et al. (2006).**

Considerando um referencial Euleriano, conforme apresentado na Figura (3.1), são apresentadas a seguir as equações de águas rasas utilizadas pelo módulo 2DH do SisBaHiA.

A primeira equação de águas rasas, denominada equação da Continuidade (Volume), é dada por:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

O significado físico de cada termo da equação da continuidade é descrito na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1 – Significado físico dos termos da equação da continuidade, adaptado de Rosman et al. (2006).**

$\frac{\partial \zeta}{\partial t}$	Representa a taxa de elevação do nível d'água.
$\frac{\partial UH}{\partial x}$	Representa o fluxo efetivo de água na direção x.
$\frac{\partial VH}{\partial y}$	Representa o fluxo efetivo de água na direção y.

A segunda e a terceira equações de águas rasas são denominadas equações da quantidade de movimento, resultantes nas direções x e y, respectivamente, e são dadas por:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0 H} \left( \frac{\partial (H \bar{\tau}_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (H \bar{\tau}_{xy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_x^S - \tau_x^B) + 2\Phi \sin \theta V \quad (9)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0 H} \left( \frac{\partial (H \bar{\tau}_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (H \bar{\tau}_{yy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_y^S - \tau_y^B) - 2\Phi \sin \theta U \quad (10)$$

O significado físico de cada termo da equação da quantidade de movimento resultante na direção x é descrito na Tabela 3.2. O mesmo se dá para os termos da equação da quantidade de movimento resultante na direção y.

**Tabela 3.2 – Significado físico dos termos da equação da quantidade de movimento, adaptado de Rosman et al. (2006).**

$\frac{\partial U}{\partial t}$	Representa a aceleração local do escoamento 2DH, i.e., em uma dada posição, a taxa de variação temporal da quantidade de movimento média na vertical por unidade de massa. Em escoamentos permanentes, esse termo é igual a zero.
$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y}$	Representa a aceleração advectiva do escoamento 2DH, i.e., em um determinado instante, representam o balanço dos fluxos advectivos médios na vertical, por unidade de área, de quantidade de movimento na direção x, por unidade de massa. Em escoamentos uniformes, esses termos são iguais a zero.
$-g \frac{\partial \zeta}{\partial x}$	Representa a variação da pressão hidrostática na direção x (gradiente de pressão), devido à declividade da superfície livre na direção x. Conforme indicado pelo sinal negativo, este termo força escoamentos de lugares onde o nível de água é mais alto para onde o nível de água é mais baixo.

$\frac{1}{\rho_0 H} \left( \frac{\partial(H \bar{\tau}_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(H \bar{\tau}_{yx})}{\partial y} \right)$	Representa a resultante das tensões dinâmicas turbulentas 2DH no escoamento, i.e., em um determinado instante, representam o balanço dos fluxos difusivos médios na vertical, por unidade de área, de quantidade de movimento na direção x, por unidade de massa. Por exemplo, esses termos são responsáveis pela geração de vórtices horizontais em zonas de recirculação.
$\frac{1}{\rho_0 H} (\tau_x^S)$	Representa a tensão do vento na superfície livre por unidade de massa. Se o vento estiver na mesma direção do escoamento, esse termo irá acelerar o escoamento; se estiver oposto, irá retardar o escoamento.
$\frac{1}{\rho_0 H} (-\tau_x^B)$	Representa a tensão de atrito no fundo atuante no escoamento 2DH por unidade de massa. Conforme indicado pelo sinal negativo, esse termo sempre tende a desacelerar o escoamento. É sempre oposto ao escoamento.
$2\Phi \sin \theta V$	Representa a aceleração de Coriolis decorrente do referencial estar se movendo com a rotação da Terra. Esse termo é irrisório próximo ao equador, i.e., em baixas latitudes, e pouco relevante em corpos de água relativamente pequenos como a Baía de Vitória, por exemplo.

As variáveis físicas contidas nas Equações (8), (9) e (10) são descritas na Tabela 3.3.

**Tabela 3.3 – Descrição das variáveis físicas das equações da continuidade e da quantidade de movimento.**

$t$	É o tempo [s].
$x, y$	São as coordenadas cartesianas [m].
$\zeta$	É a elevação da superfície livre acima do nível de referência [m].
$U, V$	São as componentes, nas direções x e y respectivamente, da velocidade média na vertical [m/s].
$H$	É a profundidade total da água, $H = h + \zeta$ , sendo h a profundidade da água abaixo do nível de referência [m].
$UH$ e $VH$	São as vazões unitárias por unidade de largura nas direções x e y, respectivamente [m <sup>3</sup> /s/m].
$g$	É a aceleração gravitacional [m/s <sup>2</sup> ].

$\rho_0$	É a massa específica do fluido [Kg/m <sup>3</sup> ].
$\bar{\tau}_{ij}$ , $i, j = 1, 2$ .	São as tensões turbulentas [N/m].
$\tau_i^S$ , $i = 1, 2$ .	É a tensão de atrito na superfície livre [N/m].
$\tau_i^B$ , $i = 1, 2$ .	É a tensão de atrito no fundo [N/m].
$\Phi$	É a velocidade de rotação angular da Terra ( $= 7.27 \times 10^{-5}$ ) [rad/s].
$\theta$	É o ângulo de latitude [rad].

### 3.3. A MALHA COMPUTACIONAL NO SISBAHIA

As malhas utilizadas para representar a batimetria de geometrias complexas que estão sob o efeito de alagamento e secamento precisam ser flexíveis e de boa representatividade para que o resultado numérico apresentado seja o mais próximo possível da realidade. Esta característica pode ser encontrada nas malhas usadas em modelos computacionais de escoamento de águas rasas baseados em elementos finitos, como é o caso do SisBaHiA.

A dinâmica de alagamento e secamento em regiões cujo domínio contempla áreas sujeitas a este mecanismo, tais como planícies de maré, envolve variação posicional do contorno d'água e a sua representação pode ser realizada através de uma malha móvel ou fixa.

Segundo Nielsen e Apelt (2003) ainda não está claro o funcionamento de malhas móveis sobre planícies de maré, além do possível surgimento de instabilidades numéricas. Já no caso das malhas fixas, existe uma em que seus elementos e nós são desligados temporariamente, mas que em modelos baseados em elementos finitos pode experimentar instabilidade. De acordo com Bates (2000) a maioria dos modelos hidráulicos utiliza uma aproximação de grade fixa.

O SisBaHiA se espelha nessa maioria dita por Bates (2000), porém a sua malha fixa não se serve da técnica de desligamento de elementos e nós. Nele o domínio da região de interesse tem sua geometria representada por pontos discretos através de



uma malha computacional constituída de elementos triangulares de 6 nós e/ou quadrangulares de 9 nós, utilizando uma formulação Lagrangeana sub-paramétrica.

Apesar de o SisBaHiA aceitar os dois tipos de elementos numa mesma malha computacional, o software Argus ONE que foi utilizado para a geração de malhas gera apenas malhas com elementos de um mesmo tipo. Além disso, Rosman et al. (2006) apontam a preferência ao uso de malhas numéricas compostas por elementos quadrangulares no SisBaHiA, pois estas apresentam maior estabilidade e acurácia.

Os elementos quadráticos Lagrangeanos sub-paramétricos, têm sua geometria definida por polinômios Lagrangeanos lineares, enquanto que as variáveis do escoamento e parâmetros do domínio são definidos por polinômios Lagrangeanos quadráticos. Conseqüentemente, os vértices dos elementos definem linearmente sua geometria, enquanto as variáveis do escoamento e os parâmetros do domínio são definidos quadraticamente. Para isso, é necessário um nó adicional exatamente no meio de cada lado do elemento, e, no caso de quadriláteros, também um nó no centro do elemento. Dessa forma, garante-se um esquema numérico potencialmente de quarta ordem<sup>3</sup> (ROSMAN et al., 2006).

Os polinômios Lagrangeanos utilizados em formulação de elementos finitos são funções de forma ou de interpolação e independem do tempo. Logo, as dimensões espaciais e temporais são desacopladas, o que significa que a discretização delas podem ser realizadas via esquemas numéricos distintos.

Assim, o SisBaHiA utiliza esquemas de diferenças finitas de segunda ordem para a discretização temporal. Uma fatoração implícita de segunda ordem é empregada nos termos não lineares, e o esquema de Crank-Nicholson é adotado para os termos lineares. Conseqüentemente, o esquema numérico resultante para o módulo 2DH é teoricamente de ordem  $(\Delta t^2, \Delta x^4)$ . Onde  $\Delta x$  representa a escala espacial de um dado elemento e  $\Delta t$  o intervalo de tempo. Entretanto, a depender da irregularidade da

---

<sup>3</sup> Se os nós adicionais estiverem fora do ponto médio dos lados do elemento, a ordem do esquema cai até primeira ordem. Isso ocorre em formulações isoparamétricas quadráticas. Utilizando uma formulação subparamétrica, esse problema é facilmente evitado, (Celia e Gray (1984) apud ROSMAN et al., 2006).

discretização espacial, na prática o esquema será, no mínimo, de ordem  $(\Delta t^2, \Delta x^2)$  (ROSMAN et al., 2006).

### 3.4. AS CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO NO SISBAHiA

A existência e unicidade de uma solução para as equações de águas rasas, que formam o modelo matemático hidrodinâmico de um determinado corpo d'água, é rigorosamente dependente de um grupo consistente de condições iniciais e de contorno (ROSMAN et al., 2006).

#### 3.4.1. As condições iniciais

No modelo hidrodinâmico do SisBaHiA é preciso fornecer, no instante inicial de simulação  $(t_0)$ , os valores da elevação da superfície livre ' $\zeta$ ' e as componentes da velocidade 2DH, U e V, a todos os nós do domínio.

Segundo Rosman et al. (2006), qualquer resultado prévio adequado pode ser usado como condição inicial para o mesmo domínio de modelagem - já que o instante correspondente àquele resultado também é informado para o modelo - configurando uma simulação realizada através de uma 'partida a quente', pois se trata de uma condição inicial correspondente a um padrão de circulação realista. Se não houver nenhum resultado prévio adequado para ser usado como condição inicial, então uma condição chamada 'partida a frio' deverá ser utilizada.

Para se obter uma condição de 'partida a frio' que satisfaça às equações governantes basta especificar um nível d'água horizontal e velocidades 2DH nulas.

Ao utilizar a condição de 'partida a frio' deve-se evitar diferenças significativas entre os valores de condição inicial e os valores de condição de contorno no primeiro passo de tempo.

Além disso, deve-se evitar condições 'não naturais', pois isso implicará no aumento do *período de aquecimento*<sup>4</sup> exigido pelo modelo. Por exemplo, geralmente em

---

<sup>4</sup> O período de aquecimento é, em geral, de um ou dois ciclos de maré, mas nem sempre é interessante, pois pode não apresentar qualquer significado físico.

baías, têm-se ondas de maré quase estacionárias, com velocidades se aproximando de zero nos instantes próximos da maré alta e baixa. Assim, se for o caso, embora matematicamente correto, não se deve estipular um valor zero para  $\zeta$ ,  $U$  e  $V$  como condição inicial, pois corresponderia a uma onda de maré progressiva. Seria muito mais adequado, fornecer uma condição de maré quase estacionária, com um valor,  $\zeta$ , constante e adequado de baixa-mar ou preamar, e valor nulo para  $U$  e  $V$  (ROSMAN et al., 2006).

### 3.4.2. As condições de contorno

Para simular a circulação hidrodinâmica num domínio computacional é necessário estabelecer condições de contorno para o campo de velocidade e de elevação da superfície livre da água.

Na modelagem hidrodinâmica de regiões costeiras e estuarinas são impostas a condição de fluxos/velocidades normais nulos, sobre fronteiras fechadas (terra) que não possuem contribuição externa e a elevação da superfície livre, ou níveis d'água, sobre fronteiras abertas, como condições de contorno. A elevação da superfície livre é, geralmente, o principal forçante prescrito ao longo dos contornos abertos.

Em nós posicionados na embocadura de rios, em pequenos estuários ou vertedores, o fluxo ou a velocidade tem de ser dado.

Segundo Rosman et al. (2006), para se evitar efeitos de camada limite<sup>5</sup> em corpos de água rasos, a condição de contorno típica em fronteiras de terra é a especificação da componente da velocidade ( $U_N$ ) ou de fluxo ( $Q_N$ ) normal ao contorno. E a condição típica em contornos abertos é a prescrição da elevação da superfície livre ao longo do contorno aberto em qualquer instante.

O SisBaHiA pode utilizar contorno de terra impermeável ou permeável para simular fluxos alagando e secando margens laterais. Ambos utilizando uma malha computacional fixa.

---

<sup>5</sup> Os efeitos de camada limite ocorreriam se a condição de velocidade nula fosse especificada em contornos terrestres. Neste caso, uma discretização refinada próximo ao contorno terrestre seria necessária para capturar o perfil horizontal de velocidade.

Para simular a hidrodinâmica de extensas áreas que permanecem secas na baixa-mar e cheias na preamar deve ser utilizada a opção de alagamento e secamento. Para tanto, há duas opções no SisBaHiA que permitem tal processo:

- ✓ O ‘mecanismo de alagamento e secamento real de planícies de maré’ que utiliza o conceito de contorno de terra impermeável;
- ✓ E o ‘mecanismo de alagamento e secamento virtual de planícies de maré’ que utiliza o conceito de contorno de terra permeável;

Os dois tipos de contornos de terra são abordados na próxima seção a partir da apresentação dos mecanismos de alagamento e secamento existentes no SisBaHiA.

### **3.5. OS MECANISMOS DE ALAGAMENTO E SECAMENTO DO SISBAHIA**

Na primeira subseção é apresentado o mecanismo de alagamento e secamento real de extensas planícies de maré utilizando contornos impermeáveis. Na segunda subseção é abordado o mecanismo de alagamento e secamento virtual para simular fluxos alagando e secando margens laterais de extensas planícies de maré através da técnica de contornos permeáveis.

#### **3.5.1. Alagamento e secamento real de planícies de maré**

De acordo com Rosman et al. (2006) a opção pelo mecanismo de alagamento e secamento real deve ser feita quando o domínio de interesse contempla áreas extensas que permanecem secas durante baixos níveis de água e alagadas durante altos níveis de água. Esta opção utiliza uma malha fixa, em que se deve incluir cuidadosamente em seu domínio, a área que enche e esvazia à medida que o nível d’água varia. Ao usar essa opção, o modelo irá automaticamente gerar uma condição de contorno de nó seco para cada nó com profundidade total menor que uma profundidade mínima admissível<sup>6</sup>, usualmente a amplitude,  $\varepsilon$ , da rugosidade equivalente do fundo. Usando  $\varepsilon$  como indicativo da profundidade mínima admissível, a condição de contorno de nó seco seria escrita como:

---

<sup>6</sup> O SisBaHiA® usa como profundidade mínima admissível o valor  $\text{Min}[0.05, \varepsilon]$ , em metros.

$$\zeta = \varepsilon + h; \quad U = V = 0 \quad \text{em qualquer nó seco} \quad (11)$$

A opção de alagamento e secamento em qualquer modelo requer a elaboração cuidadosa da malha de discretização no que concerne à geometria e topografia do fundo na área sujeita a secar. O uso desta opção só faz sentido se houver significativa diferença entre as áreas de espelho de água na medida em que os níveis variam. Por exemplo, no caso de uma baía, a opção seria usada se o espelho de água de maré baixa fosse pelo menos 10% menor que o de maré cheia Rosman et al. (2006).

Maiores detalhes como, por exemplo, a especificação de afluxo ou efluxo em pontos localizados sobre o contorno de terra, entre outros, são encontrados em Rosman et al. (2006).

### 3.5.2. Alagamento e secamento virtual de planícies de maré

Neste esquema foi criada uma cota denominada  $z_{alaga}$ , apresentada na Figura (3.2), que representa a cota da beira da planície de maré, situada, geralmente, próxima à cota do nível médio de maré no local.

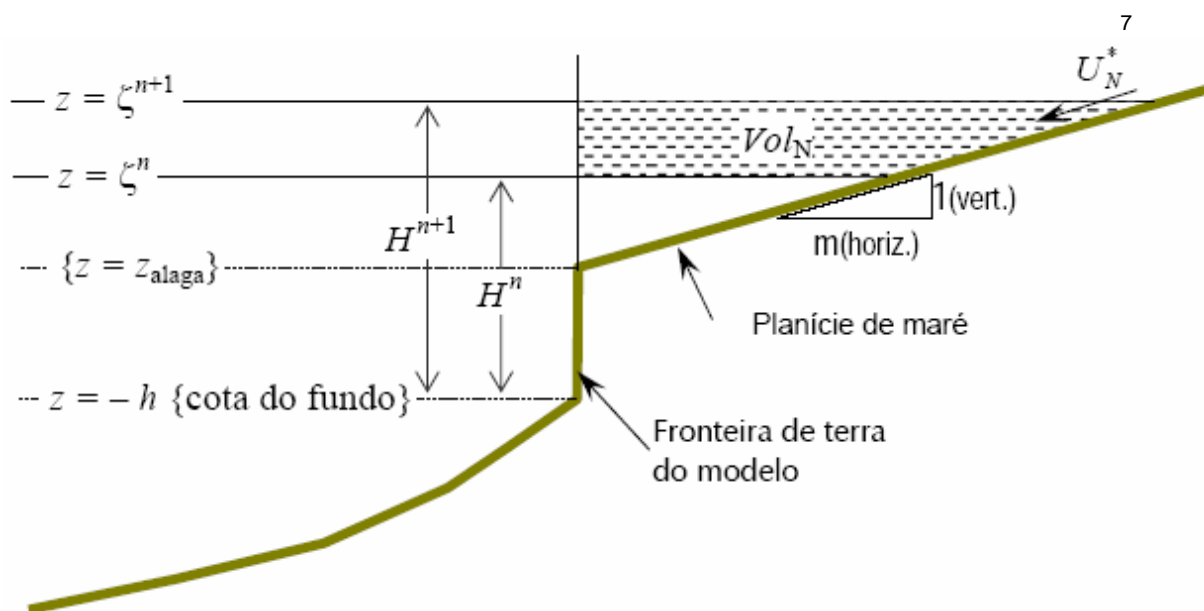


Figura 3.2 – Esquema do contorno permeável tipo planície de maré, adaptado de Rosman et al. (2006).

<sup>7</sup> O termo  $U_N^*$  representa um valor conhecido da velocidade normal ao contorno de terra, imposto em qualquer instante 't'.

No caso de planícies de maré o alagamento e secamento só ocorrem enquanto o nível d'água ' $\zeta$ ' estiver acima da cota da beira da planície de maré (ROSMAN et al., 2006).

A partir da cota de alagamento, especificada na fronteira de terra, o modelo considera uma planície de maré virtual para computar o volume de água alagando e secando essa região. Para isto, basta declarar para o modelo o valor do talude da margem (**m**) na direção normal à fronteira. A cota de alagamento é o limite a partir do qual o mecanismo virtual de planície de maré é ativado fazendo com que o volume de água aportado para dentro do domínio de interesse seja contabilizado no balanço de massa.

Rosman et al. (2006) obteve uma condição de contorno implícita relacionando a elevação da superfície livre ( $\zeta$ ) e a componente da velocidade normal ( $U_N$ ) ao contorno de terra a partir do esquema de contorno permeável do tipo 'planície de maré' mostrado na Figura (3.2) e através do uso de simples funções de geometria. Assim,

$$\frac{U_N^{n+1} + U_N^n}{2} = U_N^{*n+1/2} + \left\{ \begin{array}{ll} \frac{Q_N^{n+1/2}}{H^{n+1/2}}; & \text{se } \zeta^{n+1/2} > z_{alaga} \\ 0 & ; \text{se } \zeta^{n+1/2} \leq z_{alaga} \end{array} \right\} \quad (12)$$

sendo ( $Q_N$ ) o fluxo normal ao contorno de terra. Ou ainda,

$$U_N^{n+1} = 2 \left( U_N^{*n+1/2} + \frac{m(\zeta^{n+1} - \zeta^n)}{\Delta t} \max \left[ \frac{\zeta^{n+1/2} - z_{alaga}}{H^{n+1/2}}; 0 \right] \right) - U_N^n \quad (13)$$

e, logo, a condição de contorno é

$$\begin{aligned} -2 \frac{m}{\Delta t} \max \left[ \frac{\zeta^{n+1/2} - z_{alaga}}{H^{n+1/2}}; 0 \right] \zeta^{n+1} + \underbrace{\cos(\alpha_{Nx}) U^{n+1} + \sin(\alpha_{Nx}) V^{n+1}}_{U_N^{n+1}} = \\ 2 U_N^{*n+1/2} - 2 \frac{m}{\Delta t} \max \left[ \frac{\zeta^{n+1/2} - z_{alaga}}{H^{n+1/2}}; 0 \right] \zeta^n + \underbrace{\cos(\alpha_{Nx}) U^n + \sin(\alpha_{Nx}) V^n}_{U_N^n} \end{aligned} \quad (14)$$

onde,  $(\alpha_{Nx})$  representa o ângulo entre o vetor normal e o eixo x.  $U$  e  $V$  são as componentes, nas direções x e y respectivamente, da velocidade média na vertical.

A equação programada no modelo hidrodinâmico, a partir da versão 5 do SisBaHiA, usa uma equação com esquema numérico mais simples (ROSMAN et al., 2006), ou seja:

$$-\frac{m}{\Delta t} \max \left[ \frac{\zeta^{n+1} - z_{alaga}}{H^{n+1}}; 0 \right] \zeta^{n+1} + \underbrace{\cos(\alpha_{Nx})U^{n+1} + \sin(\alpha_{Nx})V^{n+1}}_{U_N^{n+1}} = U_N^{*n+1} - \frac{m}{\Delta t} \max \left[ \frac{\zeta^{n+1} - z_{alaga}}{H^{n+1}}; 0 \right] \zeta^n \quad (15)$$

A diferença entre as equações (14) e (15) é irrelevante e justificada pelos diferentes esquemas numéricos empregados na obtenção de cada uma delas.

A equação (14) é obtida através do esquema numérico semi-implícito de Crank-Nicolson centrado temporalmente em  $n + \frac{1}{2}$ , enquanto que a equação (15) é determinada a partir de um esquema numérico implícito adiantado temporalmente em  $n + 1$ .

### 3.6. A OPÇÃO PELO ALAGAMENTO E SECAMENTO VIRTUAL DO SISBAHIA

Na primeira subseção é apresentada a motivação para o aperfeiçoamento do mecanismo de alagamento e secamento virtual do SisBaHiA. Na segunda subseção são apresentados e avaliados os resultados dos testes realizados para estudar o comportamento da onda de maré num estreito canal de maré margeado por extensas planícies de maré, utilizando-se para tanto a técnica de alagamento e secamento real do SisBaHiA. Na terceira, e última, subseção é explicitada a escolha do devido mecanismo para cumprir com o propósito desta dissertação.

### **3.6.1. Aperfeiçoamento do mecanismo de alagamento/secamento virtual**

O modelo computacional SisBaHiA em contínuo desenvolvimento na Área de Engenharia Costeira da COPPE/UFRJ, veja Rosman et al. (2006), utiliza um método numérico baseado em 'elementos finitos' e possui implementado em seu módulo hidrodinâmico dois mecanismos de alagamento e secamento para tratar extensas áreas de enchente, tais como planícies de maré. Esses mecanismos podem tratar os efeitos desse processo hidrodinâmico numa planície de maré de forma real ou virtual.

A forma real embora investigada durante a fase de desenvolvimento desta pesquisa, por meio de testes, ainda não apresenta bons resultados para o caso particular de canais muito estreitos no meio de platôs de maré muito largos.

Devido a este fato e devido à necessidade de incorporar computacionalmente a influência dos efeitos do alagamento e secamento de tais regiões à hidrodinâmica de canais de maré, visando-se obter uma modelagem mais realista, Rosman et al. (2006) aperfeiçoou a técnica virtual já existente no SisBaHiA, implementando uma cota de alagamento para a beira da planície de maré, para simular extensas áreas alagando.

A técnica virtual pode ser vista como uma alternativa para quantificar tais efeitos e solucionar os problemas revelados nos testes do mecanismo de alagamento e secamento real durante a fase de desenvolvimento desta dissertação.

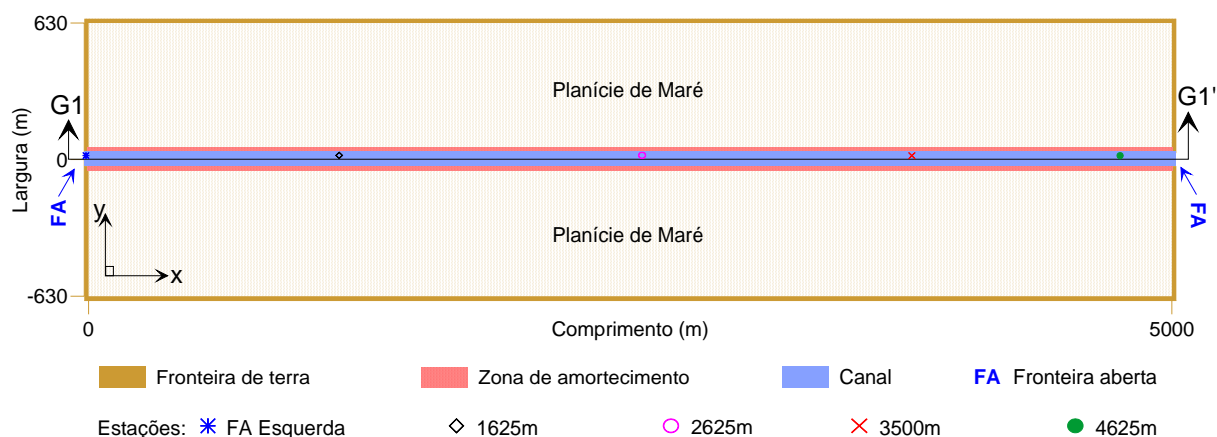
### **3.6.2. Avaliação do mecanismo de alagamento e secamento real**

A fim de analisar a predição do mecanismo de alagamento e secamento real de planície de maré do SisBaHiA quanto ao comportamento da onda de maré num canal de maré, que em particular apresenta uma geometria muito estreita se comparado à planície de maré que o margeia, foram realizados 25 testes. Para tanto, foram consideradas geometrias semelhantes à mostrada na Figura (3.3), diferindo-as entre si em termos de batimetria, largura de espelho d'água (em repouso) no canal, de inclinação de talude e de rugosidades de fundo na zona de amortecimento e na planície de maré.



A partir destas simulações foi verificado que tal mecanismo ainda não prediz bons resultados para canais estreitos margeados por extensas planícies de maré. Para ilustrar este fato, foram escolhidos apenas dois desses casos (os de melhores resultados) para serem apresentados e discutidos aqui.

Primeiramente, é considerada uma geometria idealizada denominada 'G<sub>1</sub>', conforme mostrada na Figura (3.3), constituída de um canal de 60 metros de largura (no espelho d'água em repouso) e 5.000 metros de comprimento. Lateralmente ao canal foram criadas duas faixas de 20 metros de largura (no espelho d'água em repouso) cada, denominadas 'zona de amortecimento<sup>8</sup> (ZA)' e duas planícies de maré de 580m de largura (no leito) cada uma. As fronteiras abertas e fechadas podem ser localizadas no esboço desta figura a partir das legendas da mesma.

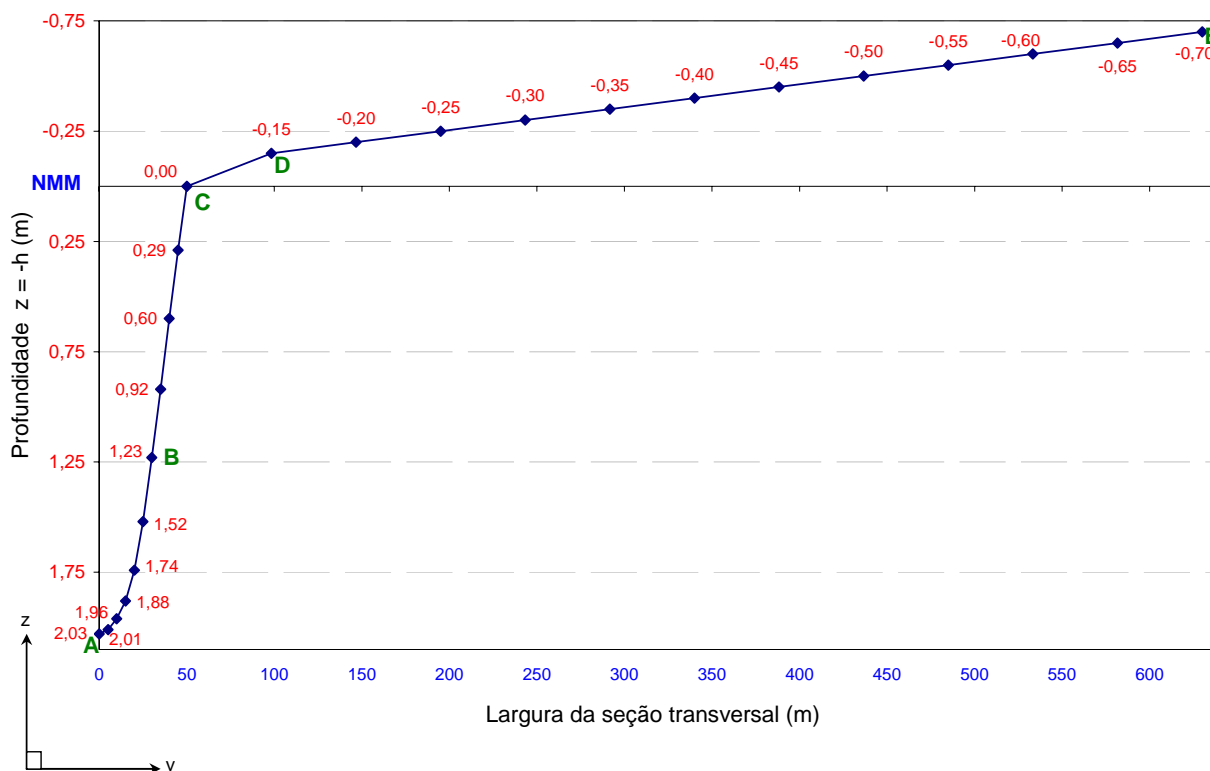


**Figura 3.3 – Geometria idealizada, denominada G<sub>1</sub>, modelada pelo SisBaHiA utilizando o mecanismo de alagamento e secamento real.**

A morfologia da região G<sub>1</sub> é simétrica, longitudinalmente, em relação ao centro do canal. Assim, na modelagem desta geometria foi utilizada no SisBaHiA apenas a região compreendida no intervalo  $0 \leq y \leq 630$  e  $0 \leq x \leq 5000$ .

A Figura (3.4) apresenta o perfil batimétrico da seção transversal de G<sub>1</sub>, relativo ao corte G1G1' ilustrado na Figura (3.3). O canal está compreendido entre os pontos A(x,0,2.03) e B(x,30,1.23); a zona de amortecimento entre B e C(x,50,0); os taludes situados entre C e D(x,98.33,-0.15) e D e E(x,630,-0.7) possuem inclinações 1:322,2 e 1:966,67, respectivamente. O nível médio da maré (NMM) é zero.

<sup>8</sup> A zona de amortecimento representa uma região adjacente ao canal, veja Figura (3.3), utilizada para prescrever altos valores de rugosidade com o intuito de induzir maior arrasto e desacelerar o escoamento transversal ao longo do canal.



Coordenadas dos pontos destacados: A(x,0,2.03) B(x,30,1.23) C(x,50,0) D(x,98.33,-0.15) E(x,630,-0.7)

**Figura 3.4 – Seção transversal da topografia de fundo da geometria idealizada 'G<sub>1</sub>', modelada pelo SisBaHiA utilizando o mecanismo de alagamento e secamento real. Os pontos representam os nós da malha real.**

Foi utilizada uma rugosidade equivalente de fundo na planície de maré de G<sub>1</sub> de 0,39 metros, típica de leito com obstáculos segundo Rosman (2000), e na zona de amortecimento de 0,50 metros para induzir maior fricção sobre essa região com o propósito de amortecer o escoamento sobre o canal que possui 0,03 metros de rugosidade.

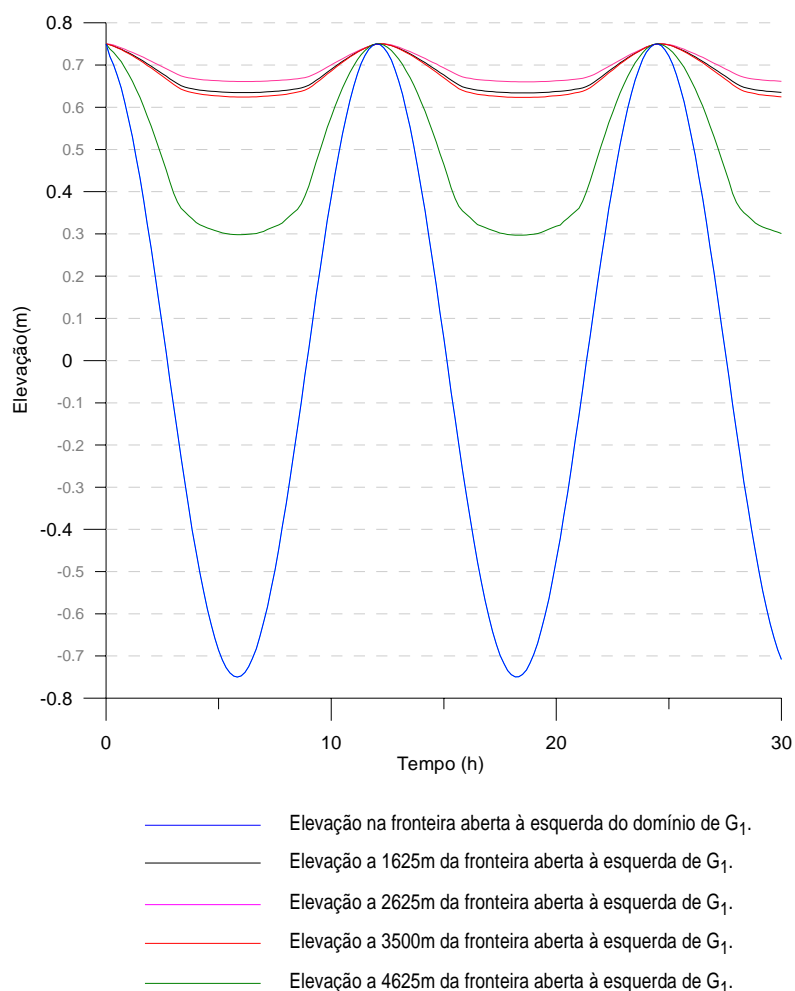
Vale ressaltar que esse canal apresenta duas fronteiras abertas e que para simular um desnível para a propagação da onda de maré sobre o mesmo foi utilizada uma diferença de fase de 1400 segundos (~ 23 minutos) entre os dois contornos. Este intervalo de tempo está relacionado à distância entre os extremos das duas fronteiras abertas e à celeridade da onda à meia profundidade, sendo estas relações diretamente e inversamente proporcionais, respectivamente.

Como condição de contorno de G<sub>1</sub> foram prescritas ao modelo SisBaHiA:

- ✓ Nas fronteiras abertas: maré M2 de amplitude de 0,75 m;
- ✓ Nas fronteiras fechadas: componentes de vazão nulas;

A condição inicial prescrita ao domínio de  $G_1$  foi um nível vertical de maré de 0,75m na estufa de preamar (partida a frio). O passo de tempo utilizado foi de 6 segundos.

A Figura (3.5) mostra o resultado dos níveis verticais de maré encontrados nesta simulação. As séries temporais de elevação de maré obtidas em  $G_1$  foram calculadas pelo SisBaHiA nas estações espalhadas a longo do centro do canal, no sentido longitudinal, nas referidas posições indicadas na Figura (3.3).



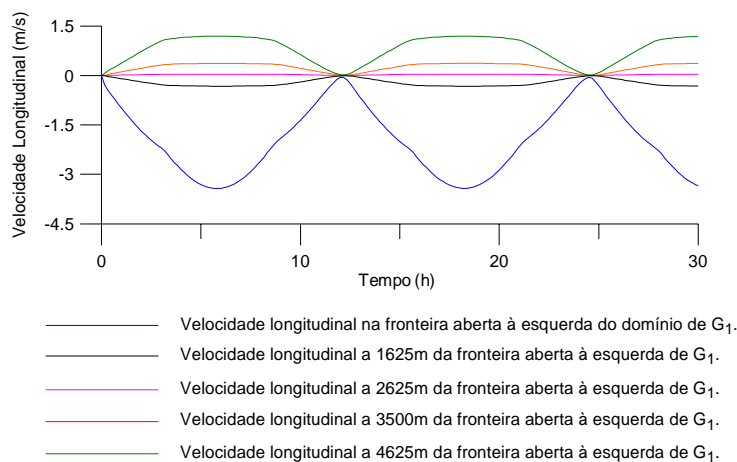
**Figura 3.5 – Séries temporais de elevação de maré calculadas pelo SisBaHiA em estações situadas longitudinalmente no meio do canal da geometria  $G_1$  considerando altos valores de rugosidade de fundo no talude e na faixa de amortecimento, utilizando o mecanismo de alagamento e secamento real.**

Tendo como baliza a elevação imposta na fronteira aberta à esquerda do domínio de  $G_1$ , pode-se perceber que os demais níveis verticais de maré calculados ficaram situados na faixa de 0,3 a 0,7 m acima do nível médio, em desacordo com a física

que rege a hidrodinâmica desse tipo de corpo d'água, que prevê a oscilação destes níveis d'água em torno do nível médio da maré.

A zona de amortecimento criada como uma alternativa de induzir as oscilações de tais níveis d'água em torno do nível médio da maré não produziu fricção suficiente a ponto de atingir tal objetivo. Assim, pode-se dizer que a desaceleração do escoamento, provocada pela ZA, transversalmente ao canal de G1 não foi suficiente para reproduzir o efeito do arrasto necessário para influenciar a hidrodinâmica no canal.

A Figura (3.6) apresenta o resultados das velocidades longitudinais no canal de G<sub>1</sub>, calculadas pelo SisBaHiA nas mesmas estações anteriores.

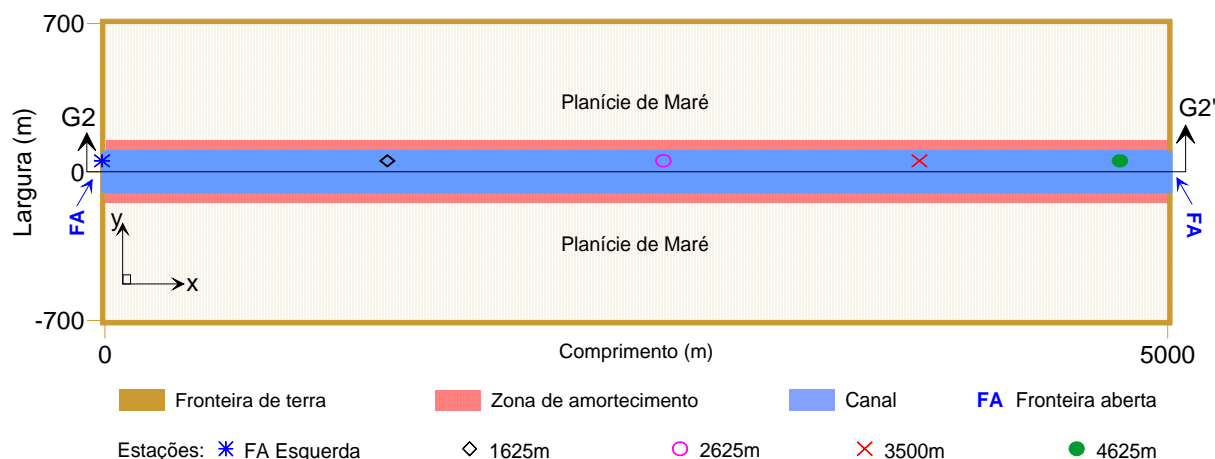


**Figura 3.6 – Séries temporais de velocidade longitudinal calculadas pelo SisBaHiA em estações situadas longitudinalmente no meio do canal da geometria G<sub>1</sub>, utilizando o mecanismo de alagamento e secamento real.**

No segundo experimento, é considerada uma geometria idealizada semelhante à 'G<sub>1</sub>', denominada 'G<sub>2</sub>' e apresentada na Figura (3.7).

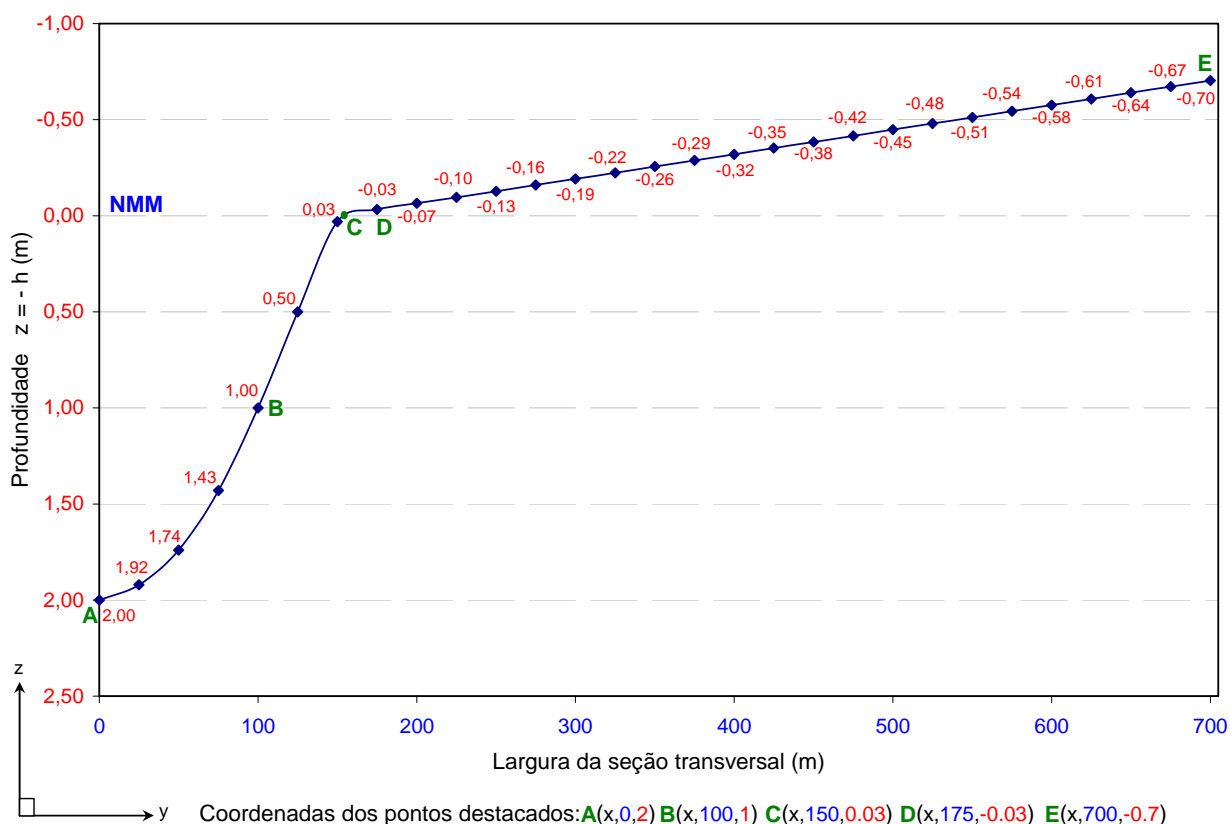
As principais diferenças de G<sub>2</sub> em relação a G<sub>1</sub> são: canal com 200 metros de largura e zonas de amortecimento com 50 metros de largura cada, ambas em relação ao espelho d'água em repouso; planícies de maré de 550 metros de largura (no leito) cada.

A morfologia da região G<sub>2</sub> também é simétrica, longitudinalmente, em relação ao centro do canal. Assim, na modelagem desta geometria foi utilizada no SisBaHiA apenas a região compreendida no intervalo  $0 \leq y \leq 700$  e  $0 \leq x \leq 5000$ .



**Figura 3.7 – Geometria idealizada, denominada  $G_2$ , modelada pelo SisBaHiA utilizando o mecanismo de alagamento e secamento real.**

A Figura (3.8) apresenta o perfil batimétrico da seção transversal de  $G_2$ , relativo ao corte  $G_2G_2'$  ilustrado na Figura (3.7). O canal está compreendido entre os pontos  $A(x,0,2)$  e  $B(x,100,1)$ ; a zona de amortecimento entre  $B$  e  $C(x,150,0.03)$ ; os taludes situados entre  $C$  e  $D(x,175,-0.03)$  e  $D$  e  $E(x,700,-0.7)$  possuem inclinações 1:416,67 e 1:783,58, respectivamente. O nível médio da maré (NMM) é zero.



**Figura 3.8 – Seção transversal da topografia de fundo da geometria idealizada ' $G_2$ ', modelada pelo SisBaHiA utilizando o mecanismo de alagamento e secamento real. Os pontos representam os nós da malha real.**

Para a presente experiência são realizadas duas simulações, veja parâmetros na Tabela (3.4).

**Tabela 3.4 – Parâmetros utilizados nas simulações 1 e 2, referentes à modelagem em  $G_2$ .**

<b>Parâmetros</b>	<b>Simulação 1</b>	<b>Simulação 2</b>
Rugosidade de fundo no canal [ m ]	0,03	0,03
Rugosidade de fundo em ZA [ m ]	0,03	0,50
Rugosidade de fundo na planície de maré [ m ]	0,03	0,39
Diferença de fase da maré no canal [ s ]	1255	1255
Maré	M2	M2
Amplitude de maré [ m ]	0,75	0,75
Passo de tempo [ s ]	12	12

Como condição de contorno de  $G_2$  foram prescritas ao modelo SisBaHiA:

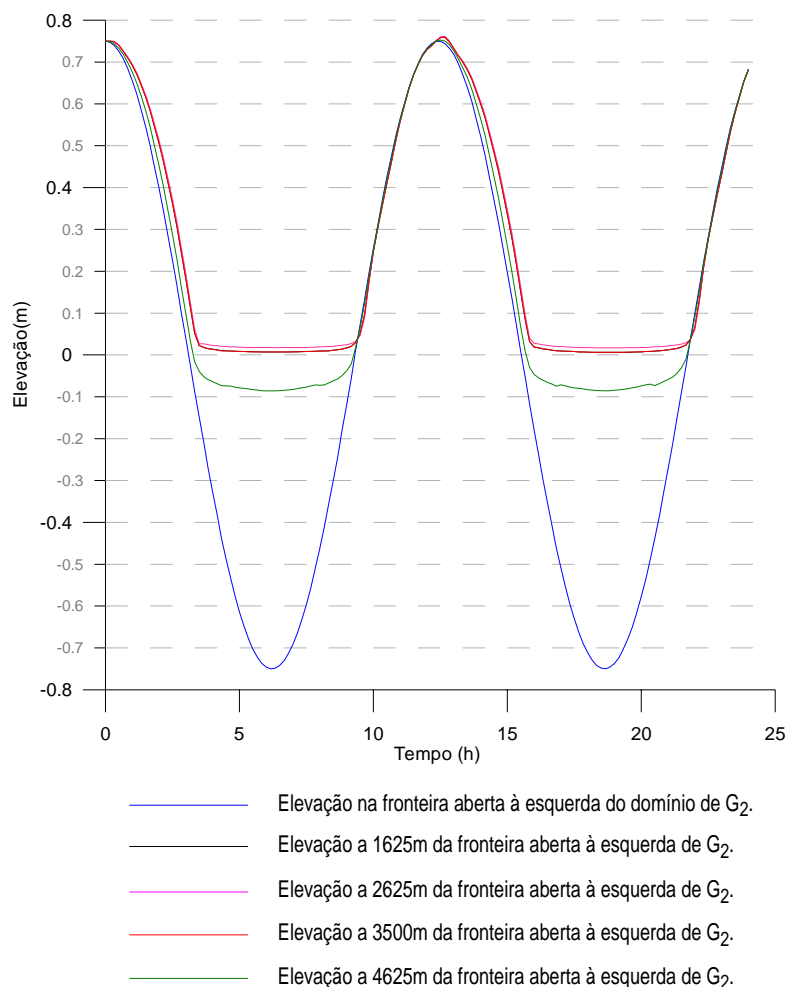
- ✓ Nas fronteiras abertas: maré M2 de amplitude de 0,75 m;
- ✓ Nas fronteiras fechadas: componentes de vazão nulas;

A condição inicial prescrita ao domínio de  $G_2$  foi um nível vertical de maré de 0,75m na estufa de preamar (partida a frio). O passo de tempo utilizado foi de 12 segundos.

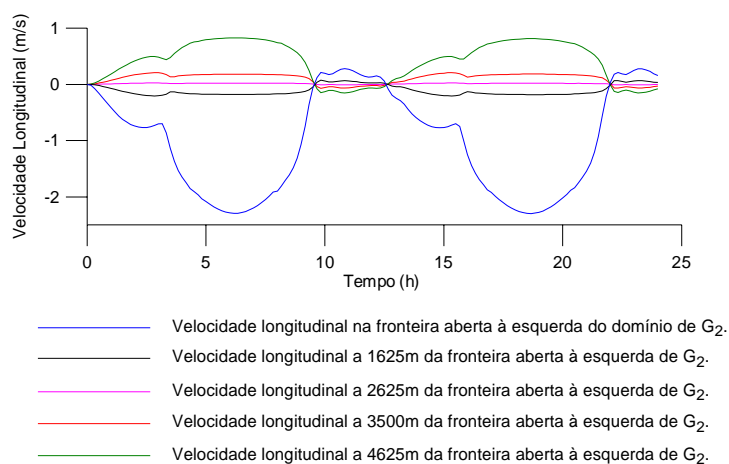
### **Resultado da Simulação 1:**

As Figuras (3.9) e (3.10) apresentam, respectivamente, as séries temporais de elevação de maré e de velocidade longitudinal resultantes da simulação 1 do experimento  $G_2$ .

Essas séries temporais foram calculadas pelo SisBaHiA nas estações espalhadas ao longo do centro do canal de  $G_2$ , no sentido longitudinal, nas referidas posições indicadas na Figura (3.7).



**Figura 3.9 – Séries temporais de elevação de maré calculadas pelo SisBaHiA na simulação 1, em estações situadas longitudinalmente no meio do canal de  $G_2$ , utilizando o mecanismo de alagamento e secamento real.**



**Figura 3.10 – Séries temporais de velocidade longitudinal calculadas pelo SisBaHiA na simulação 1, em estações situadas longitudinalmente no meio do canal de  $G_2$ , utilizando o mecanismo de alagamento e secamento real.**

### **Discussão do Resultado da Simulação 1:**

Tendo como baliza a elevação (condição de contorno) imposta na fronteira aberta à esquerda do domínio de  $G_2$ , veja a Figura (3.7) pode-se perceber que os demais níveis verticais de maré calculados pelo modelo ficaram situados na faixa de -0,1 a 0,05 m.

Em relação aos resultados de elevação de maré calculados pelo SisBaHiA em  $G_1$ , situados entre 0,3 e 0,7 m, percebe-se que nesta situação houve uma redução dos níveis verticais de maré, porém não o suficiente para que estes oscilassem em torno do nível médio ao longo de todo o canal.

Apesar dos resultados da simulação 1 em  $G_2$  apontar níveis d'água mais baixos do que aqueles encontrados na simulação em  $G_1$ , o comportamento da onda de maré no canal de  $G_2$  previsto neste teste continua em desacordo com a física que rege a hidrodinâmica desse tipo de corpo d'água, pois estes níveis d'água continuam não oscilando em torno do nível médio da maré.

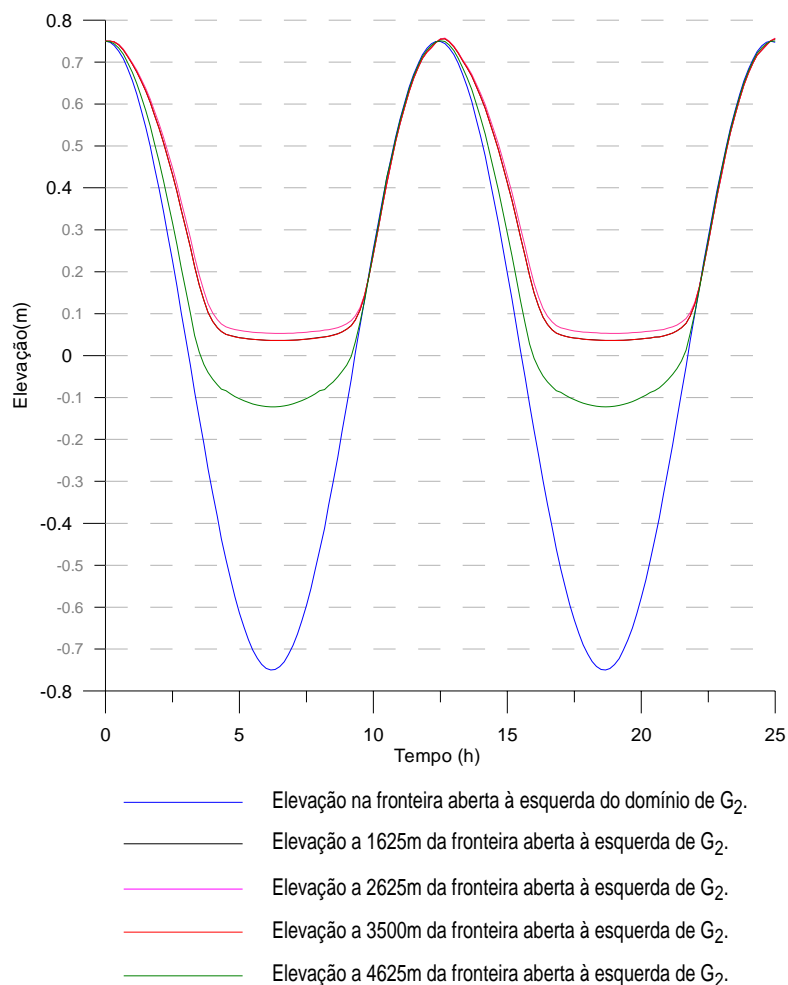
A zona de amortecimento não produziu nenhum efeito no escoamento sobre o canal de  $G_2$ , visto que a rugosidade neste caso é mínima.

### **Resultado da Simulação 2:**

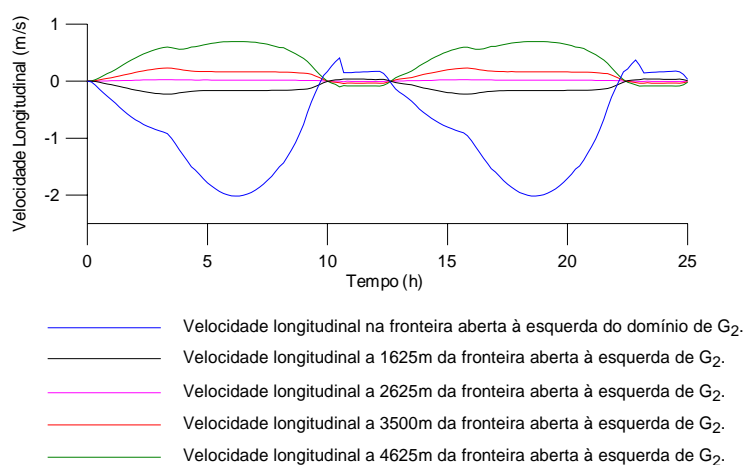
As Figuras (3.11) e (3.12) apresentam, respectivamente, as séries temporais de elevação de maré e de velocidade longitudinal resultantes da simulação 2 do experimento  $G_2$ .

Essas séries temporais foram calculadas pelo SisBaHiA nas estações espalhadas ao longo do centro do canal de  $G_2$ , no sentido longitudinal, nas referidas posições indicadas na Figura (3.7).





**Figura 3.11 – Séries temporais de elevação de maré calculadas pelo SisBaHiA na simulação 2, em estações situadas longitudinalmente no meio do canal de  $G_2$ , utilizando o mecanismo de alagamento e secamento real.**



**Figura 3.12 – Séries temporais de velocidade longitudinal calculadas pelo SisBaHiA na simulação 2, em estações situadas longitudinalmente no meio do canal de  $G_2$ , utilizando o mecanismo de alagamento e secamento real.**

### **Discussão do Resultado da Simulação 2:**

Os valores dos resultados das elevações de maré calculadas pelo SisBaHiA na simulação 2 ficaram situadas na faixa de - 0,15 a 0,1 m. A partir da comparação das simulações 1 e 2 em  $G_2$  fica evidente o efeito da rugosidade de fundo, observando-se uma suavização dos perfis de elevação na simulação 2. Mas ainda assim existem níveis d'água que continuam não oscilando em torno do nível médio da maré.

Apesar dos resultados obtidos nas duas simulações em  $G_2$  sugerirem em relação a  $G_1$  uma melhor representação dos fenômenos naturais inerentes a este tipo de região alagável, estes ainda apresentam inconsistência física quanto ao fenômeno natural que se deseja representar numericamente.

Os resultados apresentados nesta seção podem ser considerados como os mais relevantes entre todos os casos investigados ao longo do desenvolvimento desta pesquisa. De certa forma, resumem e apontam o funcionamento do mecanismo de alagamento e secamento real do SisBaHiA para o tipo de região proposta neste estudo.

Portanto, a partir da apresentação e discussão dos resultados obtidos em  $G_1$  e  $G_2$  constata-se de fato que esta técnica ainda não prediz de forma consistente<sup>9</sup> o comportamento da onda de maré em canais, para o caso particular de estreitos canais de maré margeados por extensas planícies de maré.

A próxima seção explica e confirma a escolha pelo esquema virtual do SisBaHiA como uma alternativa de predizer o comportamento da onda de maré sobre os estreitos canais ladeados por extensas planícies de maré.

---

<sup>9</sup> O termo '*consistente*', neste caso, indica coerência entre a física do fenômeno natural modelado e o resultado numérico obtido pelo SisBaHiA, em concordância com a literatura.

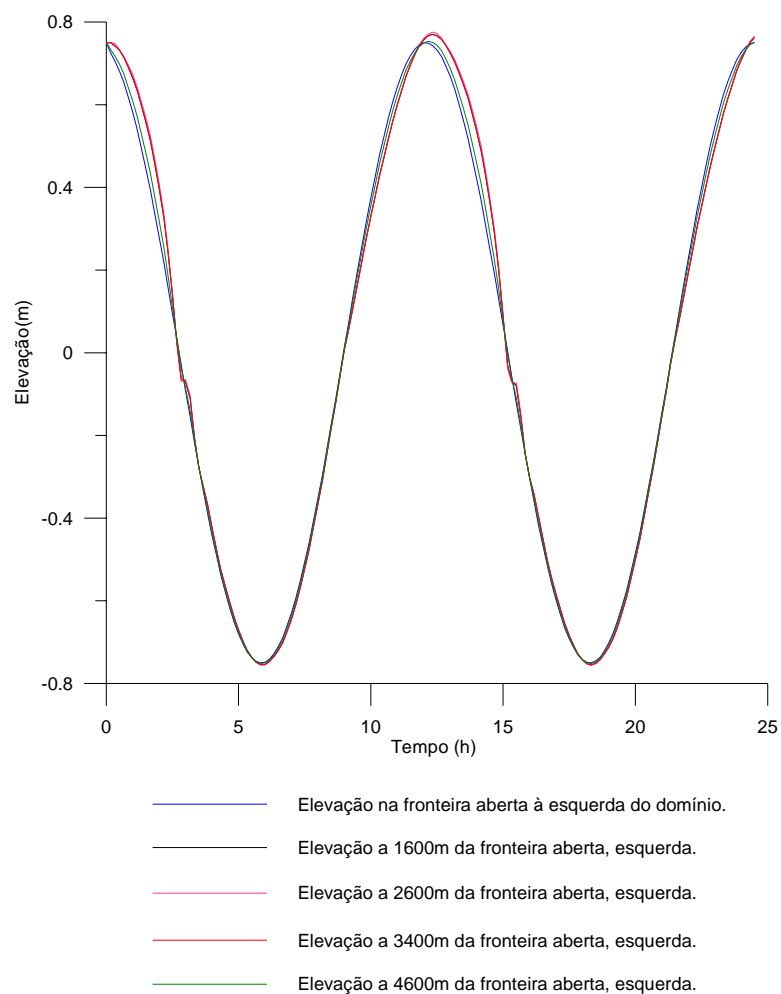
### 3.6.3. Opção pelo mecanismo de alagamento e secamento virtual

A técnica virtual implementada no SisBaHiA é interessante pelo simples fato de quantificar e de incluir os efeitos do alagamento e secamento à hidrodinâmica do canal de maré a partir da disposição de uma região virtual alagável que elimina o uso de uma malha computacional no domínio virtual de inundação. E, conseqüentemente, de qualquer algoritmo para tratar tais fenômenos sobre tal malha, que em muitos modelos numéricos é responsável por instabilidades numéricas e/ou pela não conservação da massa e/ou da quantidade de movimento.

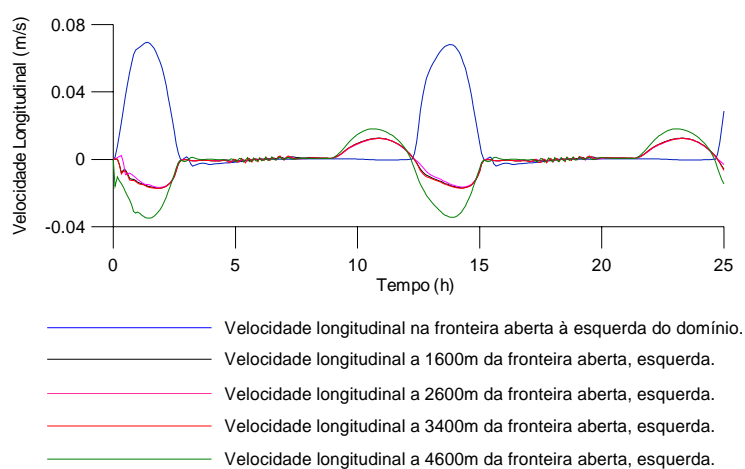
Além disso, como o objetivo aqui é o de estudar o comportamento da onda de maré no canal principal de uma geometria complexa composta por extensas planícies de maré, e não o de avaliar as correntes geradas ao longo da área do talude que alaga e seca, então, optou-se por utilizar o mecanismo de alagamento e secamento virtual de planícies de maré para investigar o que se pretende nesta dissertação.

Para sustentar esta opção, a mesma simulação 2 em  $G_2$  apresentada na seção (3.6.2) foi simulada no SisBaHiA utilizando o mecanismo de alagamento e secamento virtual de planícies de maré, sob mesmas condições. Neste caso é eliminada a malha computacional sobre a planície de maré e interpretada virtualmente pelo modelo apenas pela prescrição da inclinação do talude normal à fronteira de terra. As séries temporais de níveis d'água e de velocidades longitudinais resultantes dessa simulação podem ser vistas nas Figuras (3.13) e (3.14), respectivamente.

Deste resultado pode-se concluir que o mecanismo virtual do SisBaHiA mostra-se capaz de incluir os efeitos do alagamento e secamento à hidrodinâmica do canal de maré, predizendo uma ligeira deformação da onda de maré.



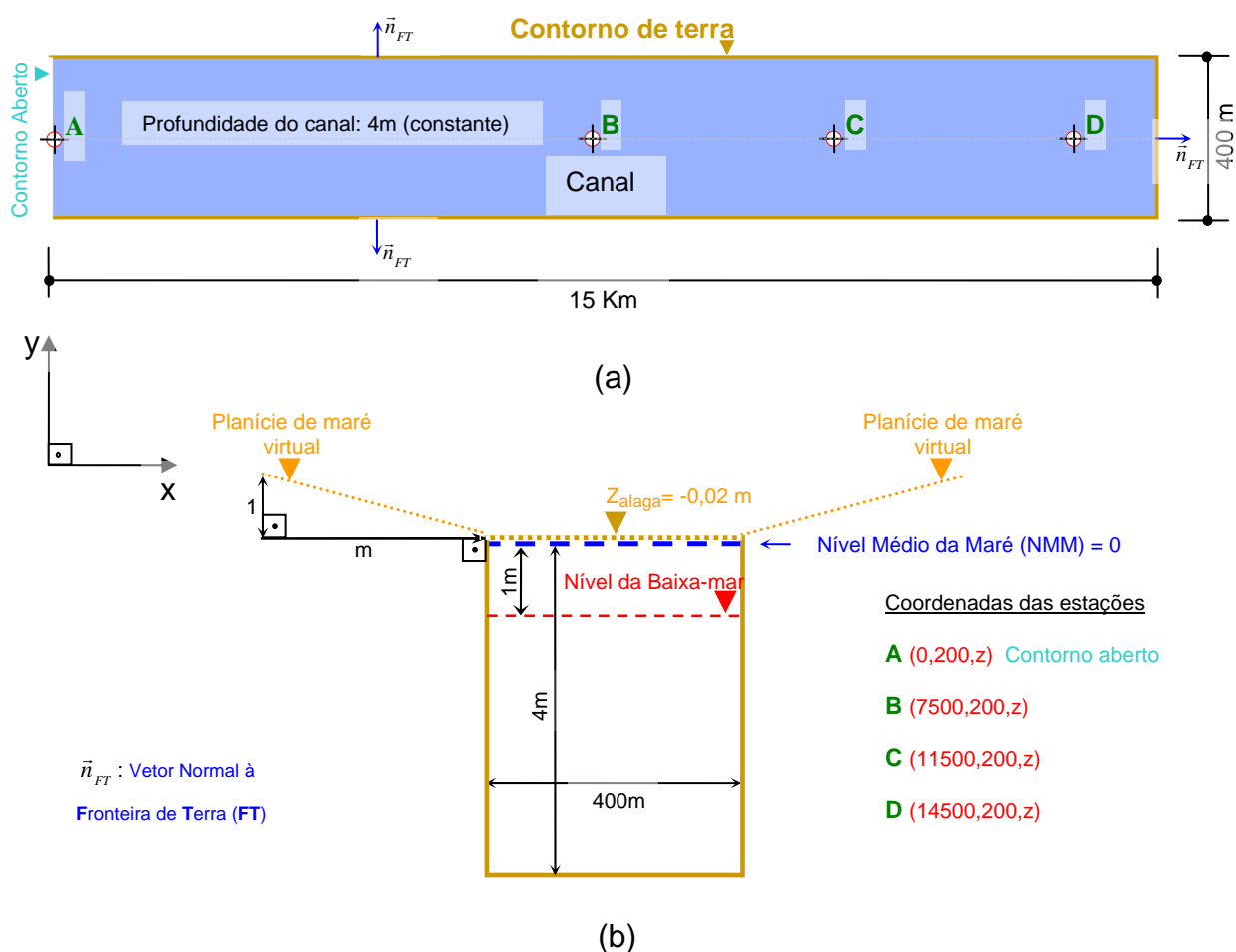
**Figura 3.13 – Séries temporais de elevação de maré calculadas pelo SisBaHiA em estações situadas longitudinalmente no meio do canal da geometria  $G_2$ , utilizando o mecanismo de alagamento e secamento virtual de planícies de maré.**



**Figura 3.14 – Séries temporais de velocidade longitudinal calculadas pelo SisBaHiA em estações situadas longitudinalmente no meio do canal da geometria  $G_2$ , utilizando o mecanismo de alagamento e secamento virtual de planícies de maré.**

### 3.7. METODOLOGIA PARA AVALIAR O MECANISMO DE ALAG./SEC. VIRTUAL

É apresentada nesta seção a metodologia proposta para avaliar numericamente o mecanismo de alagamento e secamento virtual do SisBaHiA quanto à sua predição em termos do comportamento da onda de maré num canal envolto por uma planície de maré. A Figura (3.15) ilustra a geometria real que é utilizada para tal avaliação. Nela são apresentadas as dimensões do canal idealizado, assim como a profundidade total da água no nível de baixa-mar. Ao longo do centro do canal foram espalhadas, longitudinalmente, quatro estações 'A, B, C e D' situadas nas respectivas posições: a zero metro; a 7.500 metros; a 11.500 metros e a 14.500 metros da fronteira aberta.



**Figura 3.15 – Dimensões do canal de planície de maré reto utilizado nesta pesquisa para avaliar o mecanismo de alagamento e secamento virtual: (a) Vista plana; (b) Vista da seção transversal na boca do canal.**

Para investigar o que se pretende são realizadas quatro simulações utilizando a geometria da Figura (3.15), cujos casos são diferenciados, principalmente, pela existência do talude virtual e a inclinação do mesmo que margeará todo o contorno de terra. A primeira simulação é denominada GST (Geometria sem Talude), a segunda é GTV100 (Geometria com Talude Virtual de Inclinação 1:100), a terceira é GTV1000 (Geometria com Talude Virtual de Inclinação 1:1000) e a quarta é GTV1000AD (Geometria com Talude Virtual de Inclinação 1:1000 com Atrito Diferenciado na fronteira de terra).

A Tabela 3.5 apresenta os parâmetros considerados em cada simulação descrita anteriormente.

**Tabela 3.5 – Parâmetros utilizados em GST, GTV100, GTV1000 e GTV1000AD.**

Parâmetros	GST	GTV100	GTV1000	GTV1000AD
Inclinação da planície de maré (1:m)	----	1:100	1:1000	1:1000
Inclinação do canal	0	0	0	0
Profundidade do canal [m]	4	4	4	4
Dimensão dos elementos da malha, nas direções x e y, respectivamente	500x200	500x200	500x200	500x200
Número de elementos da malha	60	60	60	60
Rugosidade no leito do canal [m]	0,02	0,02	0,02	0,02
Coeficiente de deslizamento <sup>10</sup>	1	1	1	0,1
Passo de tempo [s]	40	40	40	40
Maré	S2	S2	S2	S2
Amplitude da maré [m]	1	1	1	1
Nível médio da Maré [m]	0	0	0	0
Nível da baixa-mar (boca do canal) [m]	+1	+1	+1	+1
Nível da baixa-mar (cabeça do canal) [m]	+1	+1	+1	+1
Cota de alagamento ( $z_{alaga}$ ) [m]	----	-0,02	-0,02	-0,02

<sup>10</sup> Este parâmetro é utilizado para prescrever um atrito diferenciado ao longo do contorno de terra a fim de simular o efeito do arrasto da planície de maré sobre a água que escoar em direção ao canal e vice-versa. Quanto menor o valor mais atrito é aplicado ao longo das fronteiras de terra. Assim, 0,01 indica que nos nós do contorno de terra há uma força de atrito 100 vezes maior do que nos nós interiores e, logo, 0,1 indica um atrito 10 vezes maior. O valor 1 significa uma fronteira 100% lisa.

A simulação de GST não utilizará o mecanismo de alagamento e secamento virtual de planícies de maré do SisBaHiA, pois neste caso a planície de maré é desprezada com o objetivo de se conhecer o comportamento da onda de maré no canal apresentado na Figura (3.15), sem a influência do volume d'água que escoaria sobre a mesma, caso existisse.

Assim, através da comparação entre os resultados preditos pelo SisBaHiA em GTV100, GTV1000, GTV1000AD e GST é avaliado o comportamento da onda de maré no canal de maré proposto, numa situação em que é utilizado o mecanismo virtual do SisBaHiA e noutra em que o mesmo não é utilizado.

O caso GST servirá apenas de baliza já que não é o objetivo deste estudo a avaliação do comportamento da onda de maré em canais que não sofrem contribuição de escoamentos provenientes do armazenamento lateral de áreas alagáveis tais como planícies de maré.

O nível de referência de oscilação da maré adotado foi o nível médio da maré com valor igual a 'zero' e a cota da beira da planície de maré 'Z<sub>alaga</sub>' é de -0,02m de profundidade.

Como condição de contorno em GST, GTV100, GTV1000 e GTV1000AD foram prescritas ao modelo SisBaHiA:

- ✓ Na fronteira aberta: maré S2 de amplitude de 1,0 m;
- ✓ Nas fronteiras fechadas: vazão nula;

A condição inicial prescrita nos domínios de cada região acima citada foi um nível vertical de maré de 1,0 m na estofa de preamar (partida a frio).

Na próxima seção é feito um comentário a respeito da necessidade de verificar a qualidade dos resultados numéricos preditos por este mecanismo virtual.

### **3.8. A QUALIDADE DO MECANISMO DE ALAG./SEC. VIRTUAL**

A opção virtual configura-se como uma boa alternativa para estudar o que foi proposto nesta dissertação, porém por se tratar de uma técnica do modelo SisBaHiA

ainda não avaliada e por não se saber ao certo a qualidade numérica de seus resultados, propõe-se também uma aferição de seu resultado a partir de sua comparação com alguma solução numérica existente na literatura. Nesse caso, o que há disponível na literatura revista é o resultado obtido num experimento numérico de Wu, Falconer e Struve (2001) em que, num caso extremo, é avaliada a intensidade da corrente longitudinal no canal de maré, que é influenciada pela dinâmica de alagar e secar uma planície de maré sem vegetação de manguezal. Maiores detalhes são dados na próxima seção.

A comparação numérica entre resultados provenientes da aplicação de um mesmo caso de estudo a partir de modelos distintos e técnicas distintas, baseadas em diferentes métodos numéricos, pode acenar o nível de concordância entre as duas aproximações, porém sem quantificar de fato o quanto tais resultados se aproximam da realidade. Para tanto se faz necessário uma comparação entre dados numéricos e experimentais (coletados e monitorados em campo) correspondentes.

### **3.9. O EXPERIMENTO NUMÉRICO DE WU, FALCONER E STRUVE (2001)**

A comparação do mecanismo de alagamento e secamento virtual do SisBaHiA é realizada a partir dos perfis de elevação longitudinal do experimento numérico de Wu, Falconer e Struve (2001) num sistema de manguezal idealizado e sob o regime de maré.

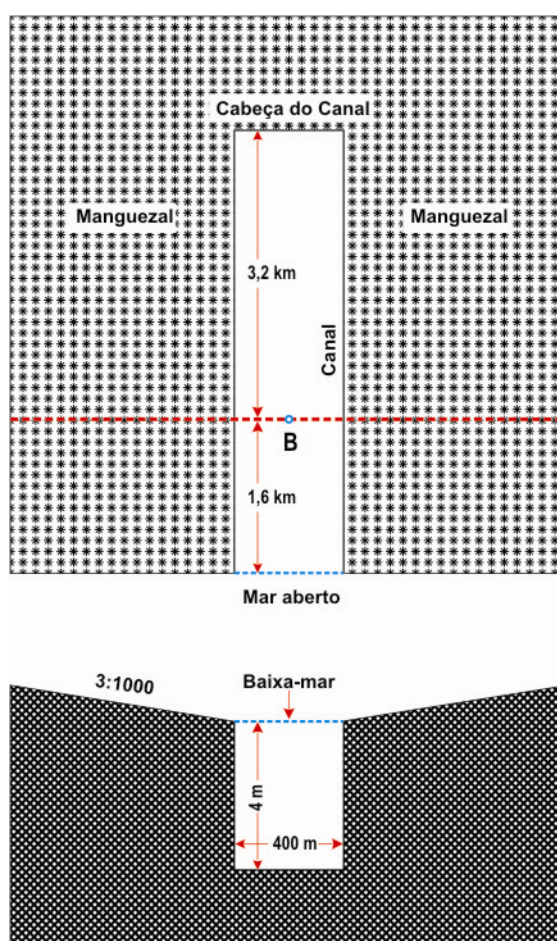
O experimento desses autores consistiu em investigar a influência das florestas de manguezal na estrutura do escoamento em estuários, refinando um modelo matemático bidimensional promediado na vertical. Um de seus resultados compara séries temporais de velocidade longitudinal numa estação 'B', localizada no canal do sistema.

Como o interesse nesta pesquisa é de avaliar apenas o escoamento no canal, devido a virtualidade da planície de maré no mecanismo virtual do SisBaHiA, é apresentado um resumo do experimento focando o resultado na referida estação 'B' fixa a 1600 m da boca do canal do sistema idealizado.



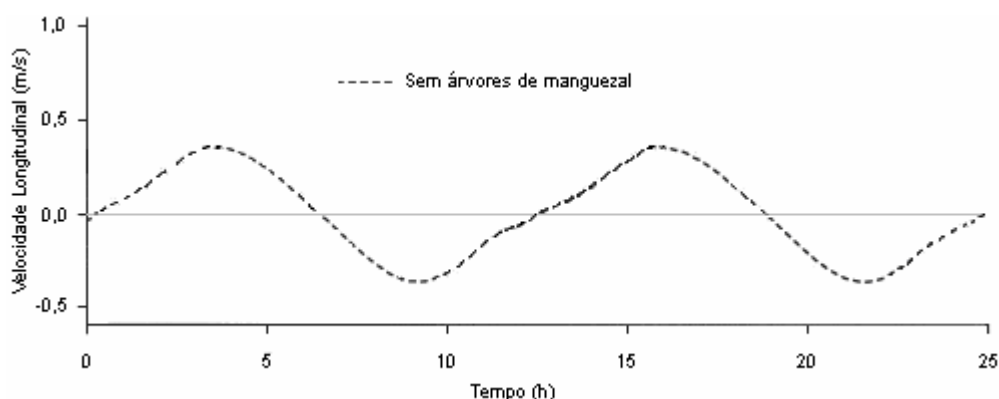
O sistema de manguezal estudado por esses autores consiste de um canal reto margeado por vegetação de manguezal. O domínio modelado possui 6000 m de comprimento e 2000 m de largura. A discretização dessa região foi realizada através de uma grade computacional de elementos regulares, isto é, uma malha típica de diferenças finitas composta de 150 x 50 células quadradas de 40 m de lado cada uma. No total foram utilizadas 7.500 células para cobrir todo o domínio e 1200 células para cobrir apenas o canal. A Figura (3.16) apresenta uma planificação dessa geometria, um corte transversal na boca do canal e as dimensões desse sistema.

O canal reto tem 4,8 km de comprimento e 400 m de largura. Na baixa-mar a profundidade d'água é de 4 m na boca do canal e gradativamente chega a zero na cabeça do canal. A planície de maré ao longo de ambos os lados do canal possui 800 m de largura e no topo do canal possui 1200 m de comprimento. A inclinação da planície de maré é de 3:1000. Foi especificada uma maré semi-diurna de amplitude de 1 m na fronteira aberta como condição de contorno. O passo de tempo utilizado foi de 12s.



**Figura 3.16 – Dimensões de um sistema de manguezal reto: (a) Vista plana; (b) Vista da seção transversal na boca do canal, adaptado de Wu, Falconer e Struve (2001).**

No experimento numérico de Wu, Falconer e Struve (2001) foi simulado um caso em que o escoamento no manguezal ocorreu na ausência de vegetação, que é o teste numérico alvo para comparar o mecanismo de alagamento e secamento virtual do SisBaHiA, já que o escopo desta pesquisa é investigar o comportamento da onda de maré no canal envolto por planícies de maré. A série temporal de velocidade longitudinal obtida na estação 'B', por estes autores, para o caso em questão é dada na Figura (3.17).



**Figura 3.17 – Série temporal de velocidade longitudinal calculada na estação 'B' do canal da geometria utilizada no experimento de Wu, Falconer e Struve (2001), adaptada destes autores.**

Maiores detalhes do esquema utilizado por Wu, Falconer e Struve (2001) na simulação dos processos de alagamento e secamento podem ser encontrados em Falconer e Chen (1991).

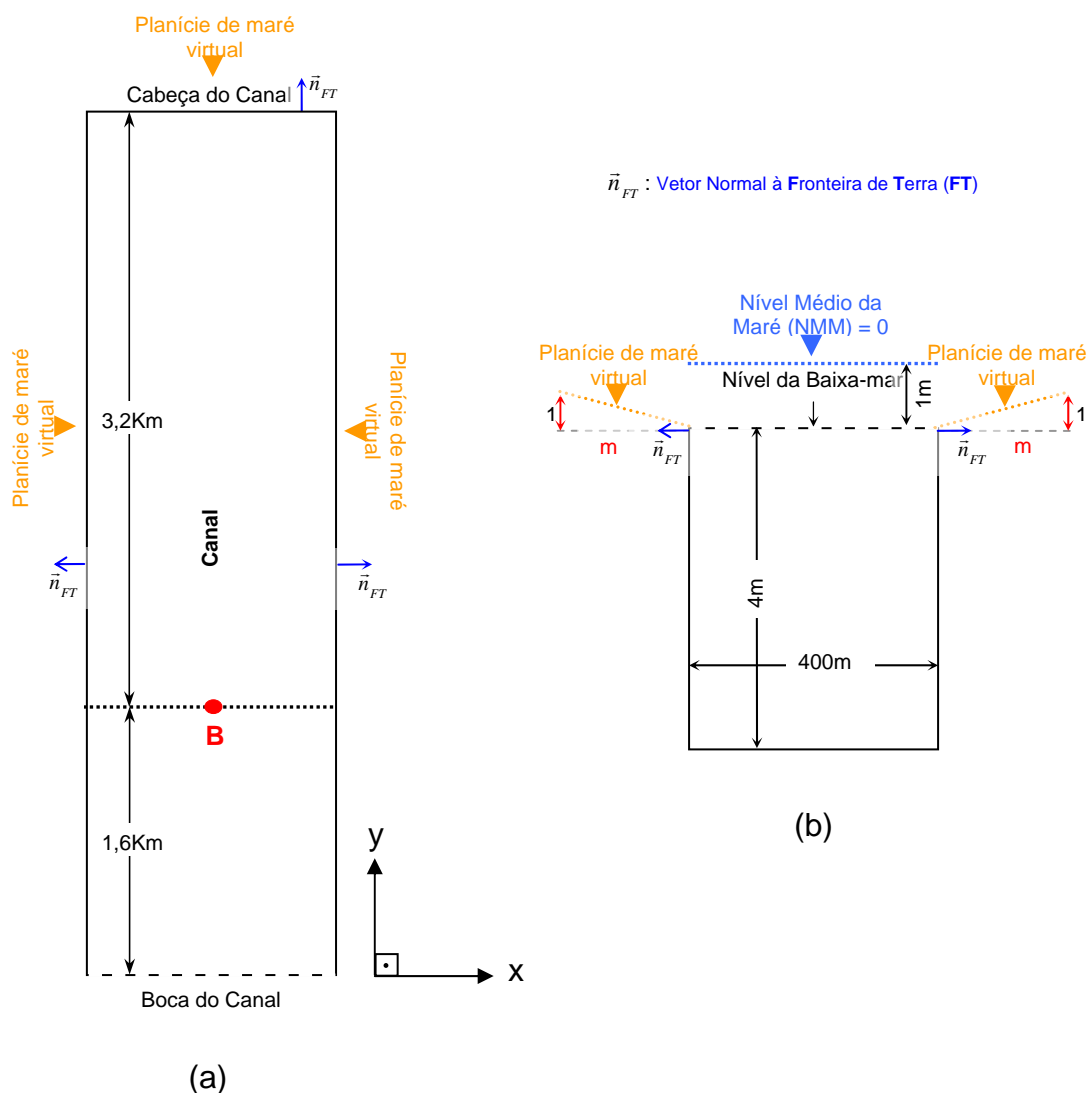
A partir da análise dos picos de corrente no canal desse experimento numérico, os autores concluíram que a planície de maré no sistema de manguezal funcionou mais como uma região de armazenamento lateral da água do que uma via de circulação o que confirma a validade de se usar o mecanismo de alagamento e secamento virtual.

### **3.10. METODOLOGIA P/ COMPARAR O MECANISMO DE ALAG./SEC. VIRTUAL**

São apresentadas nesta seção as considerações necessárias para comparar numericamente o mecanismo de alagamento e secamento virtual do SisBaHiA com o esquema de alagamento e secamento utilizado no experimento de Wu, Falconer e

Struve (2001) para a situação de ausência de vegetação de manguezal na planície de maré.

Como já visto na subseção (3.5.2), o mecanismo de ‘alagamento e secamento virtual’ funciona considerando uma planície de maré, disposta virtualmente, a partir da declaração do valor do talude da margem ‘ $m$ ’ na direção normal à fronteira de terra. Assim, a geometria complexa do corpo d’água sujeita à dinâmica de alagamento e secamento pode ser simplificada, substituindo a região da planície de maré real pela virtual. Daí o sistema de manguezal utilizado por Wu, Falconer e Struve (2001), proposto para avaliar o esquema virtual, foi simplificado excluindo-se o talude real e a vegetação, como mostra a Figura (3.18), e utilizado no modelo hidrodinâmico do SisBaHiA.



**Figura 3.18 – Dimensões do canal de planície de maré reto utilizado: (a) Vista plana; (b) Vista da seção transversal na boca do canal.**

O canal simplificado, dado pela Figura (3.18), apresenta 4800 m de extensão e 400 m de largura. A sua discretização é realizada a partir de uma malha computacional típica de elementos finitos composta de elementos retangulares de dimensões 100 x 400 m, nas direções x e y, respectivamente. A área de 1.920.000 metros quadrados do canal é coberta por apenas 48 elementos, enquanto que no experimento de Wu, Falconer e Struve (2001) esta mesma região foi representada através de 1.200 elementos quadrados de dimensões 40 x 40 m cada um.

Nesta relação fica claro que a malha que é utilizada para este teste é grosseira em relação àquela usada no experimento de Wu, Falconer e Struve (2001), pois essa possui 25 vezes menos elementos do que a malha desses autores.

O nível de referência de oscilação da maré adotado foi o nível médio da maré com valor igual a 'zero'.

A cota de alagamento ' $z_{alaga}$ ' foi imposta no nível da baixa-mar e para tanto o seu valor prescrito ao longo do contorno de terra foi de -1 m de profundidade em relação ao nível médio, como se pode observar na Figura (3.18).

A planície de maré virtual foi declarada utilizando-se um valor para ' $m$ ' igual a 333,33 em conformidade com a inclinação da planície de maré usada no experimento de Wu, Falconer e Struve (2001) que era de 3:1000. Na baixa-mar a profundidade d'água é de 4 m na boca e zero na cabeça do canal. A maré semi-diurna M2 com amplitude de 1 m foi utilizada como condição de contorno aberto. O passo de tempo utilizado foi de 12s. Apesar de Wu, Falconer e Struve (2001) não comentarem nada sobre o uso de qualquer valor de rugosidade sobre o leito do canal proposto, neste trabalho foi utilizado uma rugosidade mínima de 2 cm sobre o leito do canal reto.

Nas fronteiras de terra as vazões normais e tangenciais foram calculadas pelo modelo a partir da condição de alagamento e secamento e como condição inicial foi adotada como situação de preamar em toda a malha do domínio uma elevação de maré uniforme de +1 m e componentes de velocidade 2DH nulas (partida a frio).

No capítulo 5 é apresentado o resultado da aplicação desta metodologia sobre a geometria proposta a fim de comparar o mecanismo de alagamento e secamento virtual do SisBaHiA com o experimento numérico de Wu, Falconer e Struve (2001).

---

## **Capítulo 4**

# **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente são apresentados neste capítulo os resultados das aplicações das metodologias propostas para avaliar e comparar o mecanismo de alagamento e secamento virtual do SisBaHiA. Por fim é discutido fisicamente o comportamento da onda de maré no canal da geometria proposta para os resultados preditos pelo mecanismo de alagamento e secamento virtual do SisBaHiA.

A primeira seção apresenta os resultados das simulações numéricas realizadas no SisBaHiA para avaliar o mecanismo virtual. A segunda seção apresenta o resultado da aplicação da metodologia proposta e a efetiva comparação entre os resultados obtidos pelo esquema de alagamento e secamento utilizado por Wu, Falconer e Struve (2001) e pelo mecanismo de alagamento e secamento virtual do SisBaHiA. A terceira seção revela a discussão da física que governa os fenômenos hidrodinâmicos em situações como esta, considerando para tanto a revisão de literatura que trata da deformação da onda em canais de maré, elaborada na seção cinco do capítulo dois.

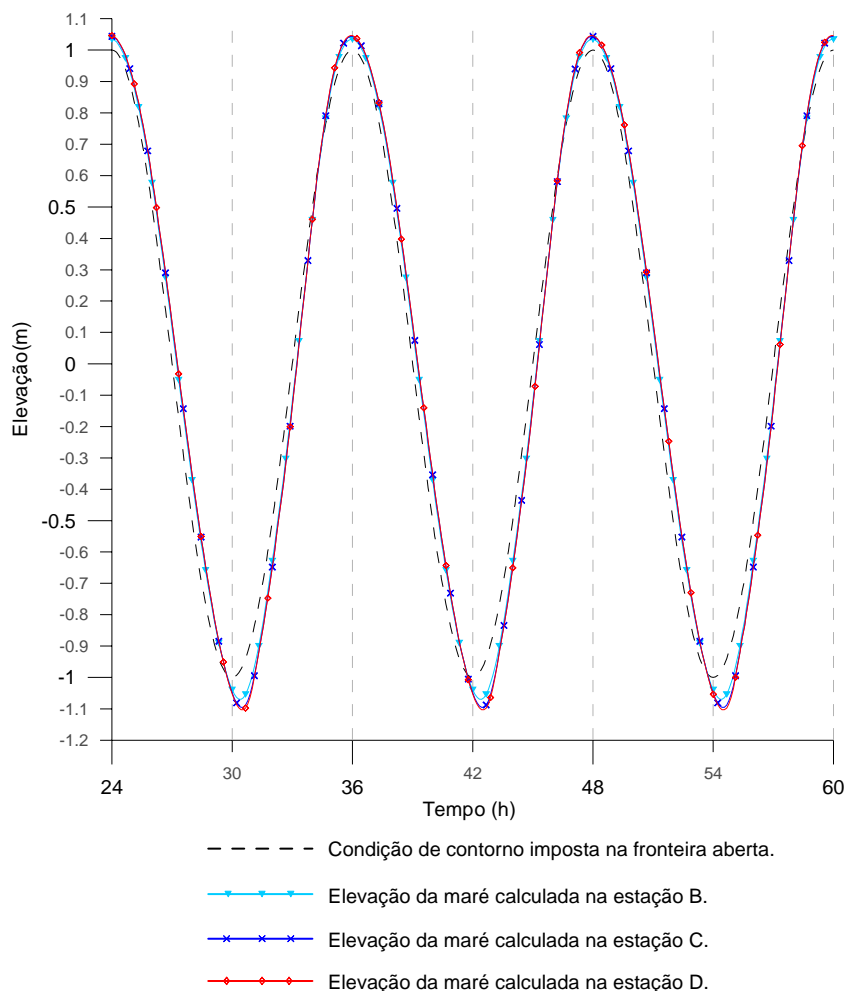
### 4.1. AVALIAÇÃO DO MECANISMO DE ALAGAMENTO E SECAMENTO VIRTUAL

Nesta seção são apresentados e comentados os resultados das simulações realizadas em GST, GTV100, GTV1000 e GTV1000AD, conforme descrito na seção (3.7). Pelo fato dessas simulações iniciarem com ‘partida a frio’, os dois primeiros períodos simulados foram desprezados dos resultados, pois o período de aquecimento delas no SisBaHiA é, em geral, de um ou dois ciclos de maré, como mencionado na seção (3.3). O passo de tempo utilizado em todas essas simulações foi de 40 segundos, conforme citado na seção (3.7).

A distorção dos níveis verticais de maré revelados nessas soluções é discutida em detalhes na seção (4.3), de acordo com a literatura que trata sobre o comportamento da onda de maré em canais, revista nesta pesquisa.

#### 4.1.1. O resultado da simulação em GST

A Figura (4.1) apresenta o resultado da simulação numérica obtido pelo SisBaHiA, desconsiderando alagamento e secamento em GST, já que este caso não considera planície de maré. As características de GST foram apresentadas na seção 3.7.

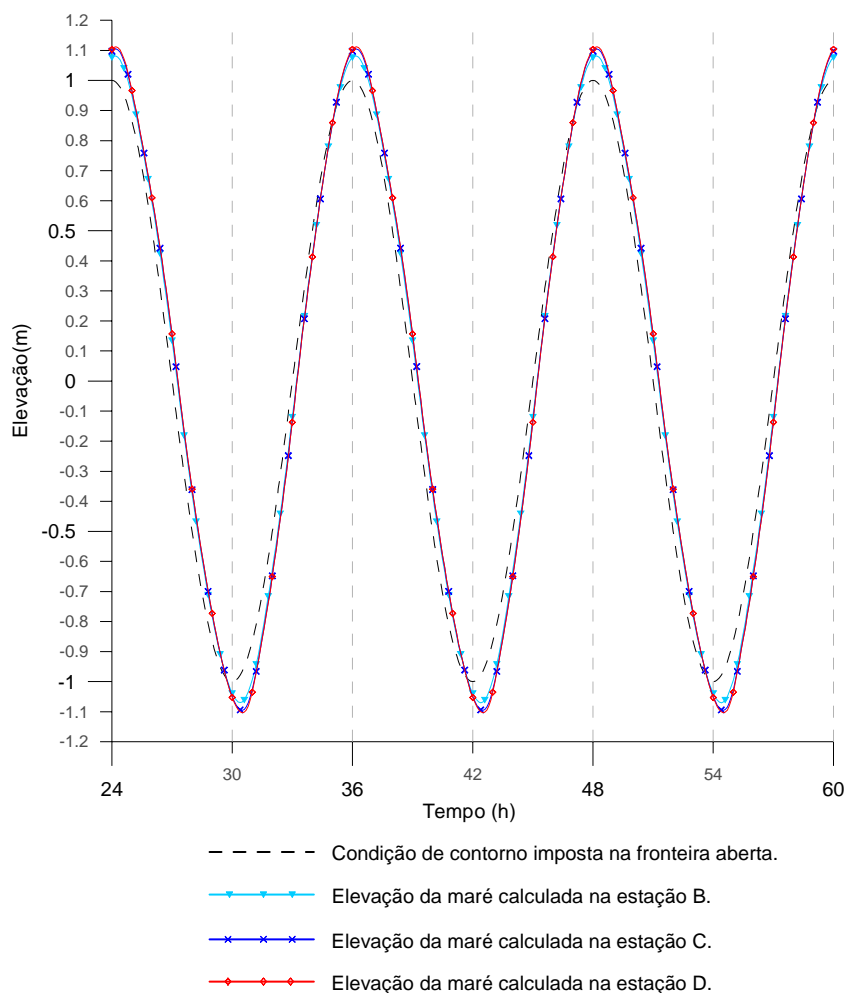


**Figura 4.1 – Séries temporais de elevação da onda de maré resultantes do cálculo realizado pelo SisBaHiA nas estações B, C e D do canal proposto, Figura (3.15), e da imposição de elevação na fronteira aberta como uma condição de contorno de GST. Nesta simulação foi desprezada a planície de maré virtual.**

Os níveis d'água calculados nas estações consideradas na Figura (3.15) indicam, em relação à maré simétrica imposta na fronteira aberta (condição de contorno), uma ligeira assimetria da onda de maré ao se propagar no canal. Nesta situação a propagação da onda na baixa-mar foi atrasada.

#### 4.1.2. O resultado da simulação em GTV100

A Figura (4.2) apresenta o resultado da simulação numérica obtido pelo SisBaHiA, utilizando o mecanismo de alagamento e secamento virtual em GTV100, cujas características foram apresentadas na seção 3.7.



**Figura 4.2 – Séries temporais de elevação da onda de maré resultantes do cálculo realizado pelo SisBaHiA nas estações B, C e D do canal proposto, Figura (3.15), e da imposição de elevação na fronteira aberta como uma condição de contorno de GTV100. Nesta simulação foi utilizada uma planície de maré virtual de inclinação 1:100.**

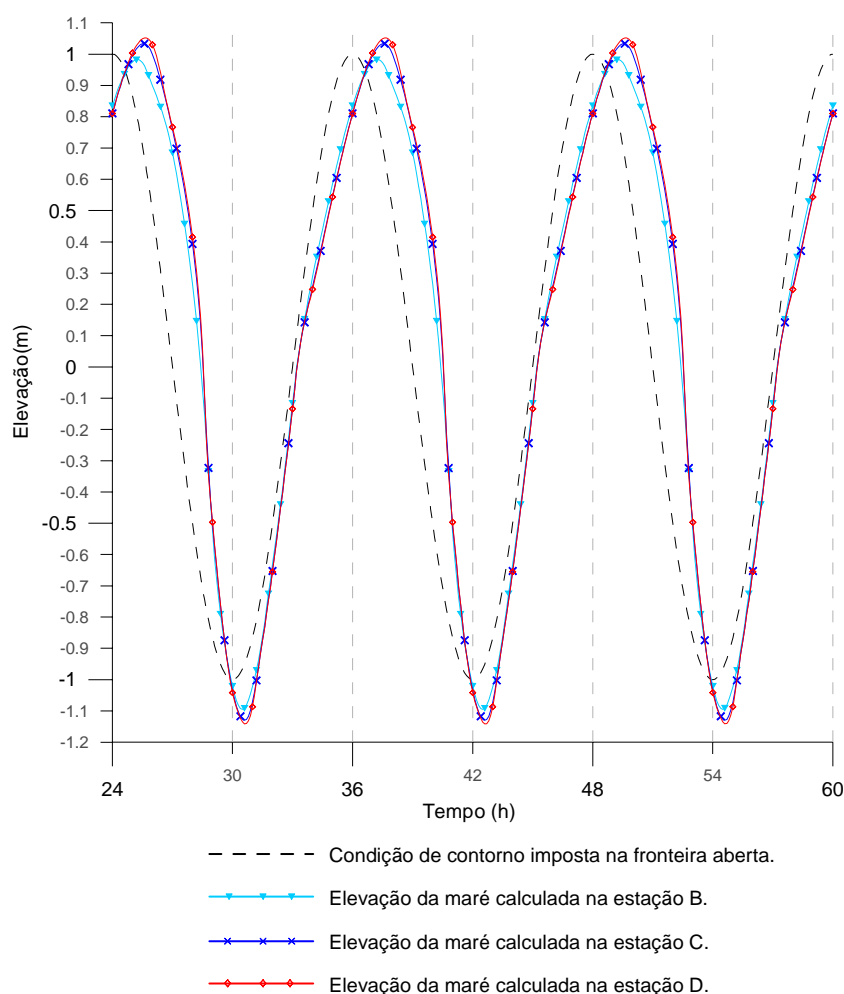
Neste caso os níveis verticais de maré calculados nas estações consideradas na Figura (3.15) também indicam, em relação à maré simétrica imposta na fronteira aberta (condição de contorno), uma ligeira assimetria da onda de maré ao se propagar pelo canal. Tais resultados apontam uma propagação atrasada da onda de maré, tanto na preamar quanto na baixa-mar, porém em menor intensidade na preamar.



Comparando este resultado ao de GST, visto na subseção 4.1.1, percebe-se a influência da dinâmica de alagamento e secamento da planície de maré virtual considerada pelo SisBaHiA acentuando tanto a distorção da onda de maré, quanto o seu pico de elevação no canal, em relação ao nível médio, na preamar.

#### 4.1.3. O resultado da simulação em GTV1000

A Figura (4.3) apresenta o resultado da simulação numérica obtido pelo SisBaHiA, utilizando o mecanismo de alagamento e secamento virtual em GTV1000, cujas características também foram apresentadas na seção 3.7.



**Figura 4.3 – Séries temporais de elevação da onda de maré resultantes do cálculo realizado pelo SisBaHiA nas estações B, C e D do canal proposto, Figura (3.15), e da imposição de elevação na fronteira aberta como uma condição de contorno de GTV1000. Nesta simulação foi utilizada uma planície de maré virtual de inclinação 1:1000.**

Nesta simulação a comparação entre as elevações de maré calculadas nas estações consideradas na Figura (3.15) indica, em relação à maré simétrica imposta na

fronteira aberta (condição de contorno), uma intensa assimetria da onda de maré tanto na preamar quanto na baixa-mar, sendo mais acentuada na preamar.

Em relação ao resultado de GST, visto na subseção 4.1.1, neste resultado percebe-se a influência do alagamento e secamento da extensa planície de maré virtual no escoamento do canal de maré, traduzindo-se numa acentuada assimetria da onda de maré, principalmente, na preamar. Além disso, de um modo geral tanto as cavas<sup>11</sup> quanto os picos<sup>12</sup> de maré apresentaram, nas dadas estações, um crescimento em relação à maré simétrica imposta na fronteira aberta como condição de contorno. Uma única oposição a esse crescimento é o pico de maré calculado pelo modelo SisBaHiA na estação B.

Em relação ao resultado de GTV100, visto na seção 4.1.2, este resultado também aponta uma forte influência do alagamento e secamento da extensa planície de maré virtual, implicando também numa assimetria da onda de maré que se propaga pelo canal, principalmente, na preamar. Neste caso, as cavas e os picos de elevação calculados pelo mecanismo virtual do SisBaHiA são relativamente, e respectivamente, mais altas e mais baixos, em relação ao nível médio da maré e às elevações calculadas nas mesmas estações. Na estação B de GTV1000 o pico de elevação em relação ao nível médio é ainda mais baixo se comparado ao de GTV100 nesta mesma estação, inclusive sendo inferior à amplitude máxima da maré simétrica (1m) imposta ao modelo na fronteira aberta como condição de contorno.

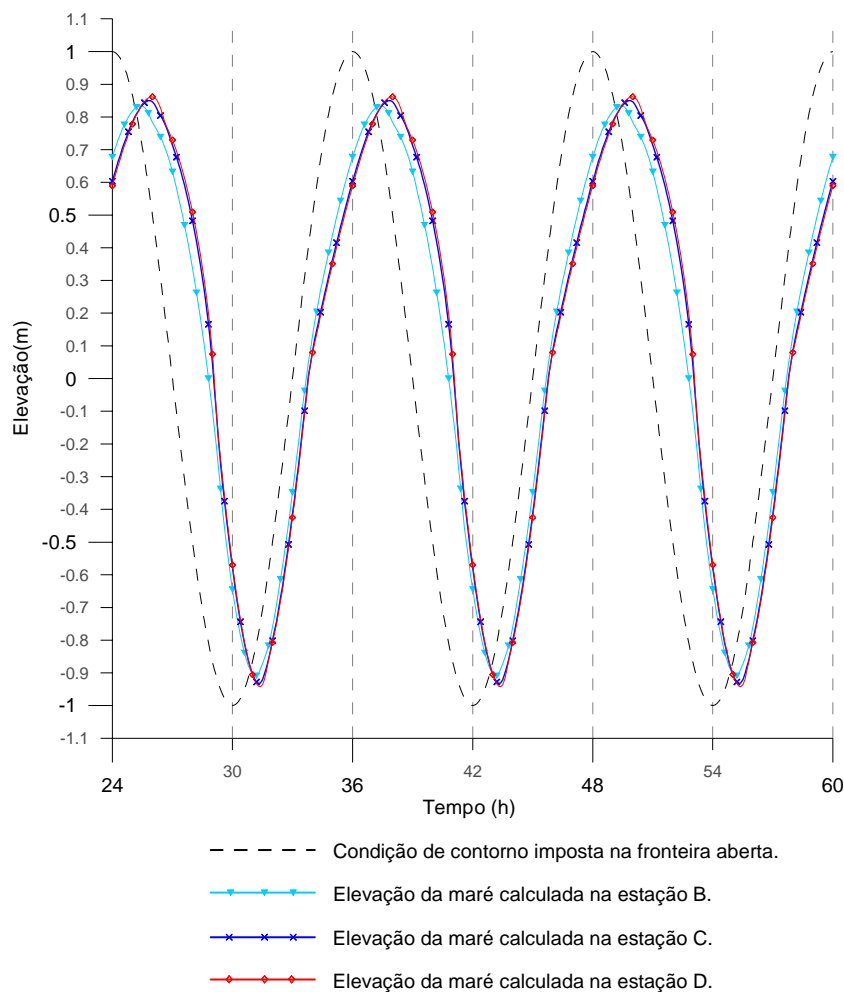
#### 4.1.4. O resultado da simulação em GTV1000AD

A Figura (4.4) apresenta o resultado da simulação numérica obtido pelo SisBaHiA, utilizando o mecanismo de alagamento e secamento virtual em GTV1000AD, cujas características são apresentadas na seção 3.7. Em relação à GTV1000 a diferença neste caso é a utilização de uma força de **Atrito Diferenciada (AD)** na fronteira de terra, sendo esta 10 vezes superior à força de atrito no canal. Este recurso foi utilizado para incorporar o arrasto produzido pela interação água-planície de maré.

---

<sup>11</sup> Nível vertical mínimo atingido pela maré na baixa-mar, num dado instante de tempo.

<sup>12</sup> Nível vertical máximo atingido pela maré na preamar, num dado instante de tempo.



**Figura 4.4 – Séries temporais de elevação da onda de maré resultantes do cálculo realizado pelo SisBaHiA nas estações B, C e D do canal proposto, Figura (3.15), e da imposição de elevação na fronteira aberta como uma condição de contorno de GTV1000AD. Nesta simulação foi utilizada uma planície de maré virtual de inclinação 1:1000 e uma força de atrito na fronteira de terra 10 vezes superior à força de atrito no canal.**

Nesta simulação a comparação entre as elevações de maré calculadas nas estações consideradas na Figura (3.15) indica, em relação à maré simétrica imposta na fronteira aberta (condição de contorno), uma assimetria da onda de maré ainda mais intensa, se comparada aos casos anteriores (GST, GTV100 e GTV1000). Tal distorção da onda de maré se verifica tanto na preamar quanto na baixa-mar, porém, semelhantemente à GTV1000, mais acentuada na preamar.

Um outro aspecto diferenciado neste resultado são as cavas e os picos de elevação que, neste caso, se apresentam reduzidos em relação ao nível médio da maré e à maré simétrica imposta na fronteira aberta, devido à dissipação de energia provocada pelo efeito do arrasto na planície de maré influenciando o escoamento no canal de maré. Assim, nesta geometria o mecanismo virtual traduz o comportamento

físico da onda de maré, no canal de maré, como se espera na natureza. Daí, pode-se concluir que a utilização de um atrito diferenciado na fronteira aberta aponta resultados realistas, confirmando a boa representatividade do mecanismo virtual do SisBaHiA na modelagem de processos de alagamento e secamento em canais de maré ladeados por extensas planícies de maré.

A partir da comparação e análise dos resultados obtidos em GST, GTV100, GTV1000 e GTV1000AD pode-se concluir que o mecanismo de alagamento e secamento virtual de planícies de maré do SisBaHiA está incorporando o efeito do processo de alagar e secar regiões de talude ao escoamento no canal. A influência deste efeito é apresentada em forma de assimetria na onda de maré no canal proposto, conforme prevê a literatura. Rigo (2004) aponta que extensas áreas alagáveis, tais como planícies de maré, tem um papel importante na deformação da onda de maré, propiciando dominância das correntes de vazante, sendo o volume armazenado em tais regiões determinante nesta dominância.

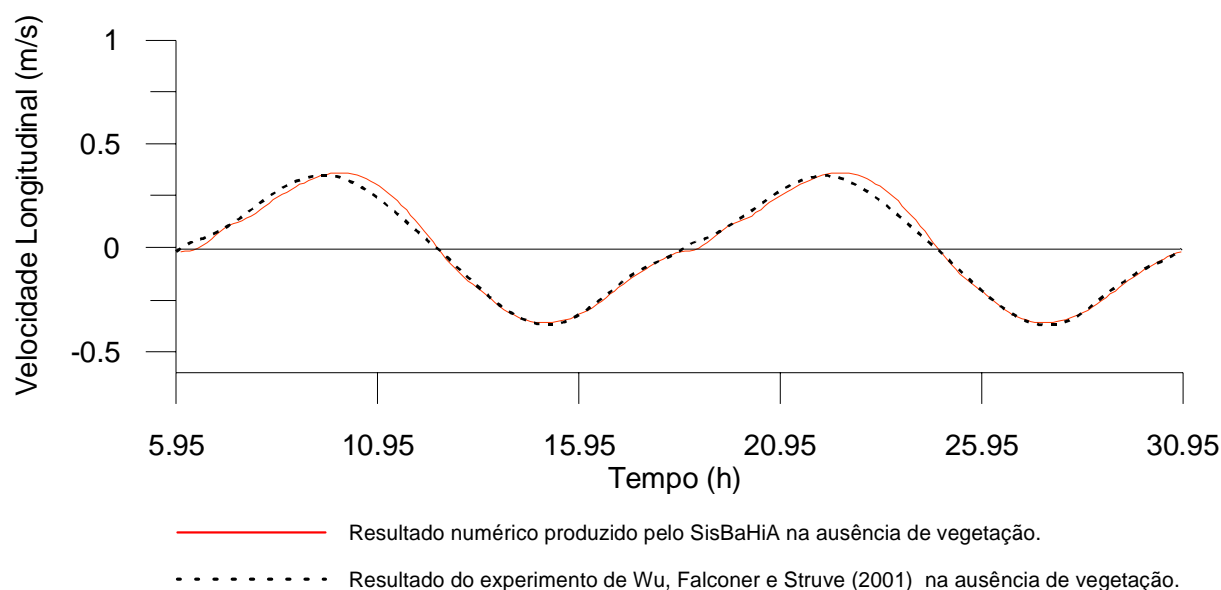
A análise dessas dominâncias determinará, segundo a revisão de literatura, a coerência física entre estes resultados preditos pelo mecanismo virtual do SisBaHiA e o fenômeno natural inerente ao escoamento nestas geometrias típicas de alagamento e secamento. Entretanto a avaliação das dominâncias nestes resultados é realizada na seção (4.3).

#### **4.1.5. Análise dos resultados do mecanismo de alag./sec. virtual**

Fica claramente evidenciado que o mecanismo de alagamento e secamento virtual do SisBaHiA reproduz a deformação da onda de maré sofrida pela mesma ao se propagar pelo canal e interagir com a geometria em questão. Embora esta predição esteja apontando uma representação realista de tais fenômenos naturais, faz-se necessário analisar a qualidade desta, como já comentado na seção (3.8), e para tanto é realizada na seção a seguir a comparação do mecanismo virtual do SisBaHiA da forma descrita na seção (3.10) a fim de se garantir realmente que este modelo é capaz de prever numericamente resultados fisicamente consistentes para este ponto específico.

## 4.2. COMPARAÇÃO DO MECANISMO DE ALAG./SEC. VIRTUAL

O confronto dos resultados do experimento de Wu, Falconer e Struve (2001), mostrado na Figura (3.18), e do mecanismo de alagamento e secamento virtual do SisBaHiA é apresentado na Figura (4.8). Essas simulações conservam as mesmas propriedades físicas em seus correspondentes períodos, ou seja, ambas descrevem as velocidades longitudinais da onda de maré enchendo ou vazando num dado intervalo de tempo correspondente.



**Figura 4.8 – Sobreposição das séries temporais de velocidade longitudinal de Wu, Falconer e Struve (2001) e do SisBaHiA.**

De modo geral, há uma boa concordância entre os dois resultados. Em particular, no regime de maré vazante as soluções se correspondem praticamente em sua totalidade. No período de enchente os picos de velocidade longitudinal ocorrem em instantes de tempo distintos, de modo que a solução apresentada pelo SisBaHiA em relação a de Wu, Falconer e Struve (2001) é subestimada em 0,029m/s na primeira metade da enchente e superestimada em 0,046m/s na segunda metade a partir do seu pico e permanece assim até a estufa de preamar, implicando assim num maior período de enchente devido o incremento de tempo durante esta fase, em relação ao tempo correspondente da solução base.

Na verdade, na primeira metade de cada período de enchente as velocidades longitudinais são levemente subestimadas durante quase todo este trecho e à

medida que o tempo avança em direção ao instante de velocidade longitudinal máxima, relativamente à solução base, o perfil de velocidade longitudinal predito pelo SisBaHiA tende a se alinhar com o perfil proposto. Entretanto, a partir do pico de enchente da curva base, tomado como o início da segunda metade do período de enchente, as velocidades longitudinais produzidas pelo modelo nesta fase chegam a ser em média 58% mais intensas do que aquelas produzidas na primeira metade da enchente.

Em outras palavras, as velocidades longitudinais durante toda a fase de enchente apontaram um aumento médio de aproximadamente 0,017m/s nas correntes longitudinais sobre o canal, enquanto que no estágio da vazante pode-se dizer que tais velocidades se mantiveram equivalentes. Embora exista uma pequena variação nas velocidades de enchente, na fase vazante o comportamento delas não se alterou, podendo assim, afirmar que o mecanismo de alagamento e secamento virtual do SisBaHiA reproduziu bem essa dinâmica para o domínio proposto.

Vale ainda ressaltar um outro ponto, a malha computacional. O resultado obtido pelo SisBaHiA foi determinado utilizando-se, na simulação hidrodinâmica da geometria proposta, uma malha composta de 48 elementos retangulares, de tamanho 100 x 400 m (nas direções x e y, respectivamente), contra as 7.500 células quadradas, de tamanho 40 x 40 m, usadas no experimento de Wu et al. (2001). Ou seja, mesmo usando uma malha mais grosseira e uma quantidade de elementos 156,25 vezes menor, esta solução ficou bem próxima daquela a que se propôs comparar.

### 4.3. A INFLUÊNCIA DO ALAGAMENTO E SECAMENTO NA ONDA DE MARÉ

O comportamento da onda de maré em regiões sujeitas à dinâmica de alagamento e secamento, tais como a região proposta neste estudo, pode ser observado pelos dados de elevação do nível d'água ou de correntes de maré em estações espalhadas ao longo do corpo d'água, veja a Figura (3.15). A fim de avaliar o potencial do mecanismo de alagamento e secamento virtual do SisBaHiA na predição do comportamento da maré no canal do domínio modelado, foram estabelecidas estações para se calcular os perfis de elevação local e também as correntes de maré. Em geral, os resultados calculados evidenciaram uma assimetria na onda de maré. Este comportamento é discutido nas próximas seções.

Cabe ressaltar que em todos os casos simulados a consideração de um talude virtual na modelagem hidrodinâmica teve um papel importante na deformação da onda de maré que escoar no canal da região em questão, e este comportamento físico está em consonância com os apontamentos de Rigo (2004). Além disso, esta influência está diretamente relacionada com a extensão dessas planícies de inundação virtuais, assim como as inclinações destes taludes. Assim, estes resultados sugerem que o volume d'água armazenado nos platôs de maré estão sendo incorporados pelo mecanismo de alagamento e secamento virtual e, logo, os efeitos da dinâmica de alagar e secar tais regiões estão sendo representados através de sua influência na hidrodinâmica do canal.

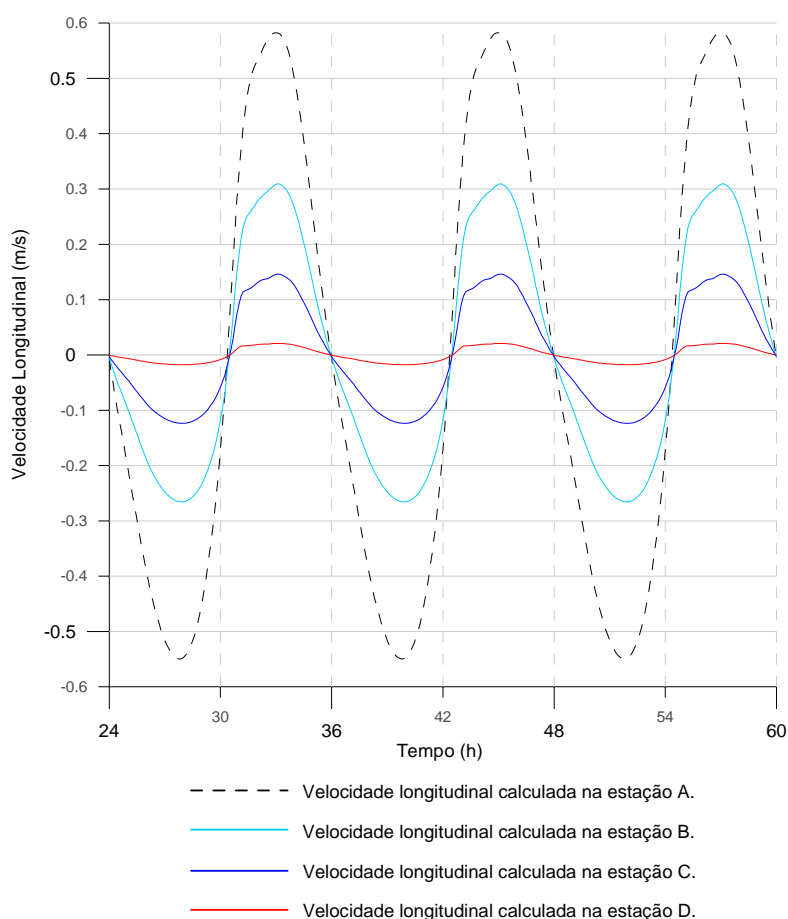
Para discutir tais questões segundo a literatura revista, são abordados primeiramente os resultados da seção (4.1) e, em seguida, os da seção (4.2). Para tanto, em todas as soluções a curva de elevação de maré que servirá de base para comparação com os resultados calculados nas devidas estações, é àquela informada ao modelo hidrodinâmico como uma condição de contorno na preamar na fronteira aberta (estação A), representada em cada gráfico através de uma curva tracejada.

### 4.3.1. Discussão dos resultados da avaliação do mecanismo virtual

Na seção (4.1) foram comentados os resultados da predição do SisBaHiA em GST, GTV100, GTV1000 e GTV1000AD. Em geral em todas as situações verificou-se uma distorção da onda de maré ao se propagar pelo canal de maré. Nas próximas subseções é discutido e avaliado a dominância das correntes no canal das geometrias utilizadas para avaliar o mecanismo de alagamento e secamento virtual do SisBaHiA. Para tanto esta análise é realizada do ponto de vista das correntes.

#### 4.3.1.1.A onda de maré no canal de GST

Para analisar a dominância das correntes ao longo do ciclo de maré é utilizada a Figura (4.9) que apresenta as velocidades longitudinais calculadas em cada estação de GST, conforme visto na seção 3.7.



**Figura 4.9 – Séries temporais de velocidade longitudinal calculadas pelo SisBaHiA, nas estações espalhadas em GST.**

Observando as correntes produzidas pelo SisBaHiA em cada estação de GST a partir da Tabela (4.1), verifica-se que as intensidades das correntes de enchente são superiores as de vazante.



**Tabela 4.1 – Velocidades longitudinais máximas calculadas pelo SisBaHiA nas estações de GST. Os valores indicados na tabela são aproximados.**

<b>Estações</b>	<b>Correntes máximas de vazante</b>	<b>Correntes máximas de enchente</b>
<b>A</b>	~ -0,550m/s	~ 0,583m/s
<b>B</b>	~ -0,266m/s	~ 0,309m/s
<b>C</b>	~ -0,124m/s	~ 0,146m/s
<b>D</b>	~ -0,018m/s	~ 0,021m/s

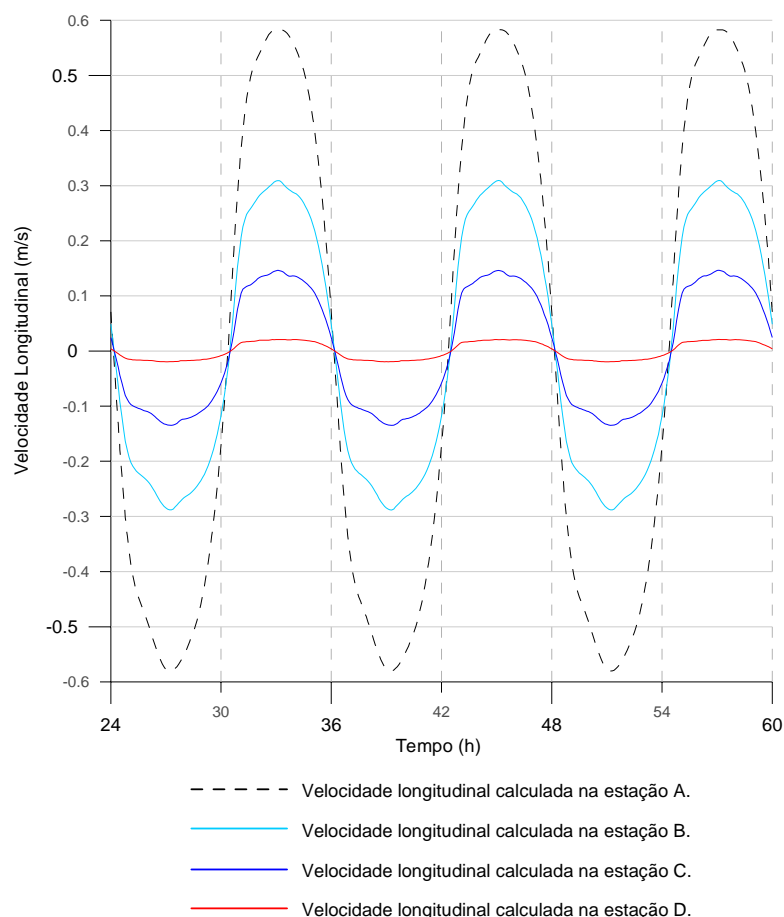
Segundo Boon & Byrne, Friedrichs & Aubrey (1981, 1988 apud Rigo, 2004) a dominância do ciclo de maré em GST é de enchente, pois as maiores velocidades são de enchente.

Speer & Aubrey e Friedrichs et al. (1985, 1992, apud Rigo, 2004) apontam que canais sem armazenamento entre-marés em baixios apresentam como característica enchente-dominantes.

Embora não faça parte do escopo deste trabalho a avaliação deste resultado, já que o alvo nesta pesquisa é avaliar regiões que sofrem alagamento e secamento, fica claro que a predição do SisBaHiA neste caso está em concordância com a literatura revista.

#### **4.3.1.2.A onda de maré no canal de GTV100**

Para analisar a dominância das correntes ao longo do ciclo de maré é utilizada a Figura (4.10) que apresenta as velocidades longitudinais calculadas em cada estação de GTV100, mencionado na seção 3.7.



**Figura 4.10 – Séries temporais de velocidade longitudinal calculados pelo SisBaHiA, nas estações espalhadas em GTV100.**

Observando as correntes produzidas pelo SisBaHiA em cada estação de GTV100 a partir da Tabela (4.2), verifica-se que as intensidades das correntes de enchente são superiores as de vazante.

**Tabela 4.2 – Velocidades longitudinais máximas calculadas pelo SisBaHiA nas estações de GTV100. Os valores indicados na tabela são aproximados.**

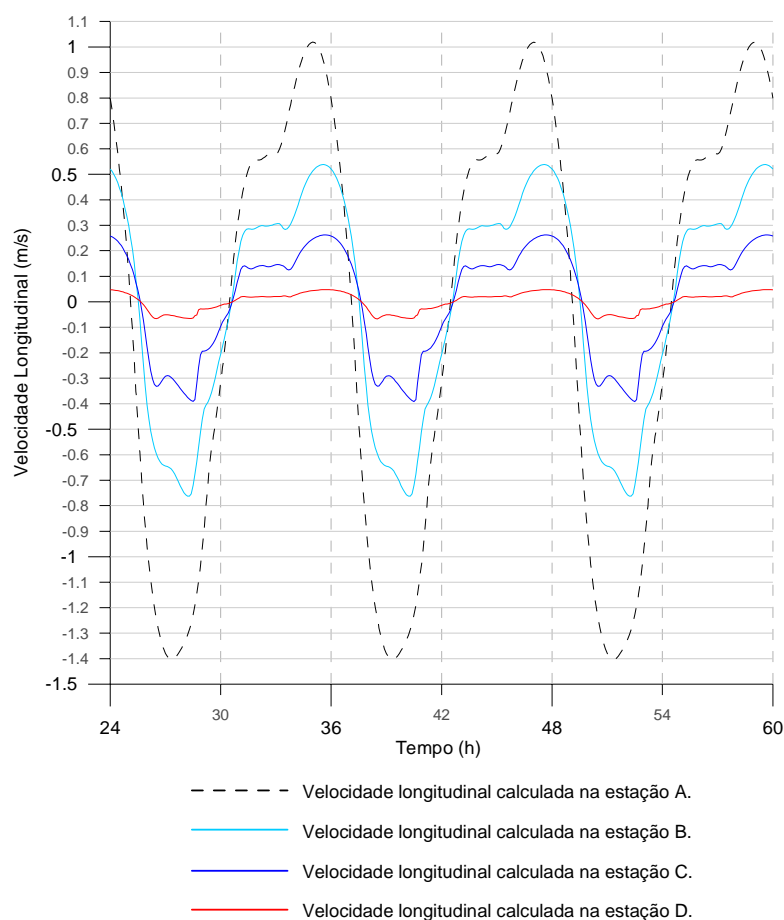
Estações	Correntes máximas de vazante	Correntes máximas de enchente
<b>A</b>	~ -0,581m/s	~ 0,583m/s
<b>B</b>	~ -0,288m/s	~ 0,309m/s
<b>C</b>	~ -0,135m/s	~ 0,146m/s
<b>D</b>	~ -0,019m/s	~ 0,021m/s

Como se pode observar neste caso as correntes de enchente são mais intensas e, logo, segundo Boon & Byrne, Friedrichs & Aubrey (1981, 1988 apud Rigo, 2004) a dominância é de enchente e então as vazantes serão mais longas. Speer & Aubrey

(1985, apud Rigo, 2004) explicam que este processo ocorre em estuários rasos onde  $\text{amplitude da maré} / \text{profundidade média} > 0,3$  e para a geometria em questão esta relação é de 1:2, ou seja,  $a/h = 0,5$ . Portanto, para esta região os resultados da modelagem estão de acordo com o previsto na literatura.

#### 4.3.1.3.A onda de maré no canal de GTV1000

Semelhantemente ao caso anterior, é utilizada para análise da dominância das correntes a Figura (4.11) que apresenta as velocidades longitudinais calculadas em cada estação de GTV1000, como descrito na seção 3.7.



**Figura 4.11 – Séries temporais de velocidade longitudinal calculados pelo SisBaHiA, nas estações espalhadas em GTV1000.**

Observando as correntes produzidas pelo SisBaHiA em cada estação de GTV1000 a partir da Tabela (4.3), verifica-se que as intensidades das correntes de vazante são superiores as de enchente. Assim, de acordo com Boon & Byrne, Friedrichs & Aubrey (1981, 1988 apud Rigo, 2004) a dominância é de vazante com enchentes prolongadas.

**Tabela 4.3 – Velocidades longitudinais máximas calculadas pelo SisBaHiA nas estações de GTV1000. Os valores indicados na tabela são aproximados.**

<b>Estações</b>	<b>Correntes máximas de vazante</b>	<b>Correntes máximas de enchente</b>
<b>A</b>	~ -1,404m/s	~ 1,019m/s
<b>B</b>	~ -0,762m/s	~ 0,539m/s
<b>C</b>	~ -0,391m/s	~ 0,262m/s
<b>D</b>	~ -0,066m/s	~ 0,048m/s

Este resultado está de acordo com o que prevê Rigo (2004), pois na maré baixa (momento em que a planície de maré está vazia e os canais estão relativamente profundos) ocorreu uma troca de água mais rápida ao longo de toda a geometria de GTV1000, implicando uma vazante relativamente mais curta e uma enchente mais longa.

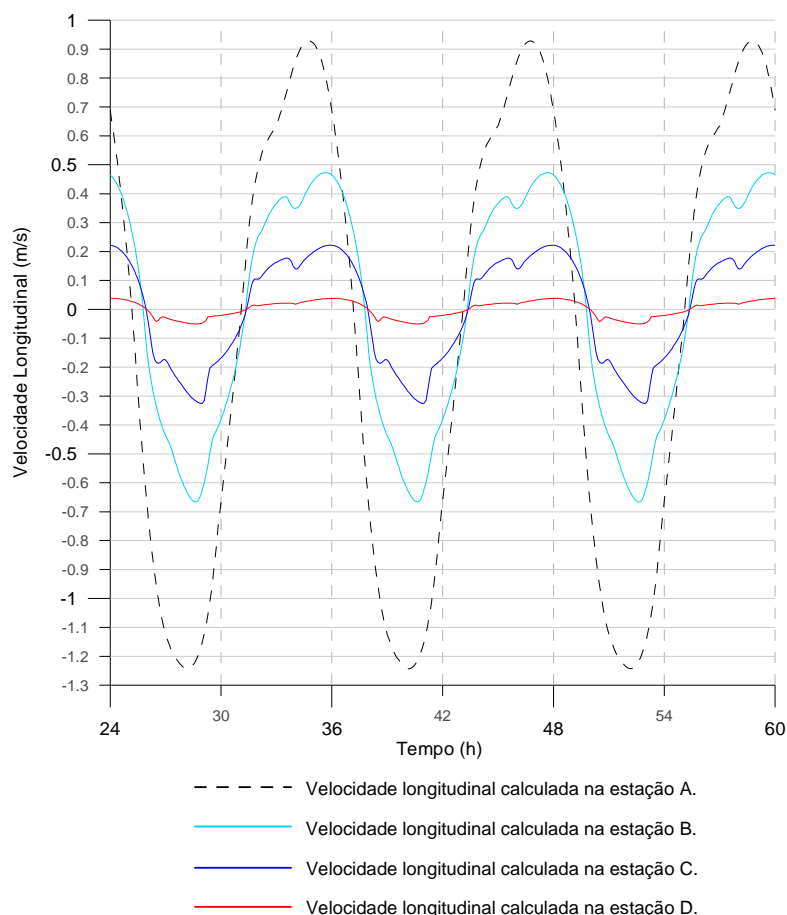
Segundo a afirmação de Rigo (2004) pode-se dizer que este extenso talude influencia a deformação da onda de maré, propiciando a dominância das correntes de vazante devido ao volume que tal talude armazena. Além disso, esse resultado também é previsto por Speer & Aubrey (1985, apud Rigo 2004), pois apesar do canal ser raso, conforme aponta a relação  $a/h = 0,5$ , inversamente ao que ocorre em GTV100, a extensão do talude em GTV1000 é muito maior e então a existência de grandes baixios de maré não permite enchente dominante nesta região.

Portanto, para esta região os resultados da modelagem também estão de acordo com o previsto na literatura.

#### **4.3.1.4.A onda de maré no canal de GTV1000AD**

Semelhantemente ao caso anterior, é utilizada para análise da dominância das correntes a Figura (4.12) que apresenta as velocidades longitudinais calculadas em cada estação de GTV1000AD, conforme descrição na seção 3.7.

Observando as correntes produzidas pelo SisBaHiA em cada estação de GTV1000AD a partir da Tabela (4.4), verifica-se que as intensidades das correntes de vazante são superiores as de enchente. Assim, de acordo com Boon & Byrne, Friedrichs & Aubrey (1981, 1988 apud Rigo, 2004) a dominância é de vazante com enchentes prolongadas.



**Figura 4.12 – Séries temporais de velocidade longitudinal calculados pelo SisBaHiA, nas estações espalhadas em GTV1000AD.**

**Tabela 4.4 – Velocidades longitudinais máximas calculadas pelo SisBaHiA nas estações de GTV1000AD. Os valores indicados na tabela são aproximados.**

Estações	Correntes máximas de vazante	Correntes máximas de enchente
<b>A</b>	~ -1,243m/s	~ 0,928m/s
<b>B</b>	~ -0,666m/s	~ 0,473m/s
<b>C</b>	~ -0,325m/s	~ 0,222m/s
<b>D</b>	~ -0,050m/s	~ 0,038m/s

Analogamente à análise realizada para os resultados de GTV1000, visto na subseção 4.3.1.3, este resultado também está em concordância com o previsto na literatura revista pelos mesmos motivos descritos em GTV1000, já que se trata da mesma geometria apenas com uma força de atrito diferenciada na fronteira aberta. Assim, conforme prevê a literatura a dominância das correntes nesta geometria é de vazante, porém em relação à GTV1000 as velocidades longitudinais calculadas em

cada estação interior ao canal de maré foram menos intensas, tanto na preamar quanto na baixa-mar, apontando a influência da intensificação do arrasto no escoamento do canal.

Assim, para situações de alagamento e secamento de extensas planícies de maré que ladeiam estreitos canais de maré, o mecanismo virtual do SisBaHiA é capaz de prever a assimetria da onda no canal incorporando o efeito do arrasto nas regiões mais internas ao canal, freando o escoamento no mesmo.

Em suma, um dos fatores geradores da assimetria na onda de maré é a existência de extensas planícies de maré que alagam e secam produzindo correntes diferenciadas entre a vazante e a enchente. E, portanto, a partir dessa investigação, pode-se afirmar que o mecanismo de alagamento e secamento virtual do SisBaHiA é capaz de reproduzir a assimetria sofrida pela onda de maré ao interagir com regiões mais complexas, como a proposta neste estudo.

---

## **Capítulo 5**

# **CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

São apresentas neste capítulo as conclusões deste estudo e, em seguida, são apontadas algumas recomendações visando o desenvolvimento de trabalhos futuros.

### 5.1. CONCLUSÕES

As conclusões seguirão de acordo com a apresentação dos objetivos específicos descritos na seção (1.2).

- ✓ O processo de alagamento e secamento apresenta diversas dificuldades, dentre as quais estão a complexidade do ambiente natural, o tratamento adequado do problema físico, a ausência de uma solução analítica conveniente e a escassez de dados de validação de alta qualidade;
- ✓ O mecanismo de alagamento e secamento real de planícies de maré do SisBaHiA não apresentou bons resultados para o caso de canais muito estreitos ladeados por planícies de maré muito largas;
- ✓ O mecanismo de alagamento e secamento virtual de planícies de maré do SisBaHiA apresentou bons resultados para o caso de canais muito estreitos ladeados por planícies de maré muito largas;
- ✓ Os resultados gerados pelo mecanismo virtual do SisBaHiA revelam que as interações da maré com a morfologia complexa dos variados sistemas de planícies de maré estudados provocaram a assimetria da onda de maré ao se propagar pelo domínio modelado, de modo fisicamente consistente, conforme indicado na literatura;
- ✓ A assimetria da onda de maré pode se tornar ainda mais realista ao se especificar no modelo uma força de atrito diferenciada na fronteira fechada, a fim de simular o arrasto oriundo da interação água-planície de maré;



- ✓ A comparação entre os resultados do SisBaHiA e do experimento de Wu, Falconer e Struve (2001) apontou uma boa concordância, principalmente durante o estágio de vazante.

Em suma, a avaliação do mecanismo de alagamento e secamento real de planícies de maré do SisBaHiA aponta necessidades de aprimoramento deste esquema para simular escoamentos sobre estreitos canais ladeados por platôs muito largos.

E, as análises da avaliação e da comparação do mecanismo de alagamento e secamento virtual de planícies de maré do SisBaHiA confirmam a validade de se usar o processo virtual para simular a hidrodinâmica em estreitos canais margeados por extensas planícies de maré, que funcionam mais como uma região de armazenamento lateral da água do que uma via de circulação.

## **5.2. RECOMENDAÇÕES**

- ✓ O aprimoramento do mecanismo de alagamento/secamento real de planícies de maré do modelo computacional SisBAHIA para que este possa prever o comportamento da onda de maré em regiões de geometrias complexas, tais como estuários, compostos por estreitos canais rodeados por extensas planícies de maré.
- ✓ Calibrar e validar o mecanismo de alagamento e secamento virtual de planícies de maré do SisBaHiA para aferir se o comportamento da onda de maré predito pelo modelo em estreitos canais de maré margeados por extensas planícies de maré, confere com o que se observa e se mede a seu respeito na região proposta.
- ✓ A avaliação e a validação do mecanismo de alagamento e secamento virtual de planícies de maré incluindo a vegetação de manguezal para avaliar o comportamento da onda de maré em estreitos canais de manguezal rodeados por extensas planícies de mangue.

---

## **Capítulo 6**

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

## 6. REFERÊNCIAS

- BALZANO, A. Evaluation of methods for numerical simulation of wetting and drying in shallow water flow models. **Coastal Engineering**, v.34, p. 83-107, 1998.
- BATES, P. D. Development and testing of a subgrid-scale model for moving-boundary hydrodynamic problems in shallow water. **Hydrological Processes**, v. 14, p. 2073-2088, 2000.
- BATES, P. D.; HERVOUET, J.-M. A new method for moving-boundary hydrodynamic problems in shallow water. **Proceedings of the Royal Society of London**, v. 455, p. 3107-3128, 1999.
- BOON, J. D. III; BYRNE, R. J. On basin hypsometry and the morphodynamic response of coastal inlet systems. **Marine Geology**, v. 40, p. 27-48, 1981.
- CASULLI, V.; CHENG, R. T. Semi-implicit finite difference methods for three-dimensional shallow water flow. **Int. J. Numerical Methods Fluids** 15, p.629-648, 1993.
- DEFINA A.; D'ALPAOS L.; MATTICCHIO B. 1994. A new set of equations for very shallow water and partially dry areas suitable to 2D numerical models. In *Modelling Flood Propagation over Initially Dry Areas*, Molinaro P.; Natale L. (eds). **American Society of Civil Engineers: New York**, p.72-81, 1994.
- DYER, K. R. **Estuaries: a physical introduction**. Second edition. John Wiley & Sons, 342p, 1997.
- DRONKERS, J. Tidal asymmetry and estuarine morphology. **Netherlands Journal of Sea Research**, 20 (2/3), p.117-131, 1986.

- FALCONER, R. A. **Mathematical Modelling of Jet-Forced Circulation in Reservoirs and Harbours**. 1976. Tese. Dept. of Civil Engineering of Imperial College, London, 1976.
- FALCONER, R. A. A water quality simulation study of a natural harbor. **J. Waterway, Port, Coastal Ocean Eng. Division**, ASCE 112 (1), p.15-34, 1986.
- FALCONER, R. A.; WOLANSKI, E., MARDAPITTA-HADJIPANDELI, L. Modelling tidal circulation in an island's wake. **Journal of Water-way, Port, Coastal and Ocean Engineering**, ASCE 112, p. 234-254, 1986.
- FALCONER, R. A., CHEN, Y. An improved representation of flooding and drying and wind stress effects in a 2-D numerical model. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, Part 2, Research and Theory 91, p. 659-687, 1991.
- FRIEDRICH, C. T.; AUBREY, D. G. Non-linear tidal distortion in shallow well-mixed estuaries: a synthesis <sup>a</sup>. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 27, p. 521-545, 1988.
- GEORGE, K. J.; STRIPLING, S. Improving the simulation of drying and wetting in a two-dimensional tidal numerical model. **Appl. Math. Modelling**, v. 19, 1995.
- HENICHE, M.; SECRETAN, Y.; BOUDREAU, P.; LECLERC, M. A two-dimensional finite element drying-wetting shallow water model for rivers and estuaries. **Advances in Water Resources**, v. 23, p. 359-372, 2000.
- HERVOUET, J. M. Validating the numerical simulation of dam-breaks and floods. In **Advances in Hydro-Science and Engineering**, v. 1, part A, Washington, D.C., p. 754-761, 1993.

- HORRITT, M. S. Evaluation wetting and drying algorithms for a finite element models of shallow water flow. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, v. 55, p. 835-851, 2002.
- JI, Z.-G.; MORTON, M. R.; HAMRICK, J. M. Wetting and drying simulation of estuarine processes. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 53, p. 683-700, 2001.
- KING, I. P. RMA2 Version 6.6 User manual. **Publication of Resource Management Associates, Inc.**, Suisun, Calif, 2000.
- LECLERC, M.; BELLEMARE, J-F.; DUMAS, G. & DHATT, G. A finite element model of estuarian and river flows with moving boundaries. **Advances in Water Resources**, v. 13, p. 158–168, 1990.
- MAC ARTHUR, R. C., DEXTER, J. R., SMITH, D. J. and KING, I. P. Two dimensional finite element simulation of the flooding characteristics in Kawainui Marsh, Hawaii. **National Hydraulic Engineering Conf.**, p. 664-669, 1990.
- MAZDA, Y.; KANAZAWA, N., WOLANSKI, E. Tidal asymmetry in mangrove creeks. **Hydrobiologia**, v. 295, p. 51-58, 1995.
- MELLOR, G. L. User's guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model. **Program in Atmospheric and Oceanic Sciences**, July 2002 version, pp. 42, Princeton University, 2002.
- NIELSEN, C.; APELT, C. Parameters affecting the performance of wetting and drying in a two-dimensional finite element long wave hydrodynamic model. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 129, n° 8, p. 628-636, 2003.
- Oey L.-Y. A wetting and drying scheme for POM. **Ocean Modelling**, n. 9, p. 133-150, 2005.

- PACHECO, C. G. **Proposta de metodologia para a calibração de modelos computacionais para unidades de contato através de curvas de passagem**. 2004. Dissertação de Mestrado em Ciências em Engenharia Ambiental – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2004.
- QUECEDO, M.; PASTOR, M. A reappraisal of Taylor-Galerkin algorithm for drying-wetting areas in shallow water computations. **International Journal for Numerical Methods in Fluids**, v. 38, p. 515-531, 2002.
- RIGO, D.; CHACALTANA, J. T. A. Computational modelling of mangrove effects on the hydrodynamics of Vitória Bay, Espírito Santo – Brazil. **Journal of Coastal Research**, Special Issue 39 (Proceedings of the 8th International Coastal Symposium - ICS 2004), p. 1543-1545, 2006.
- RIGO, D. **Análise do escoamento em regiões estuarinas com manguezais – medições e modelagem na baía de Vitória, ES**. 2004. Tese de Doutorado em Ciências em Engenharia Oceânica - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.
- ROCHA, A.B. **Estudo da hidrodinâmica e do transporte de solutos na baía do Espírito Santo através de modelagem computacional**. 2000. Dissertação de Mestrado em Ciências em Engenharia Ambiental – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2000.
- ROSMAN, P.C.C. **Métodos numéricos em recursos hídricos**. ABRH, v. 1, 1989.
- ROSMAN, P. C. C.; CABRAL, M. N.; CUNHA, C. N.; PÉCLY, J. O. G. SisBaHiA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental), **Documentação de Referência Técnica**, Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica, COPPE/UFRJ, 2006.

- ROSMAN, P. C. C. SisBaHiA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental), **Guia do Usuário do SisBaHiA**, Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica, COPPE/UFRJ, 2000.
- SPEER, P. E.; AUBREY, D. G. A study of non-linear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems. Part II: Theory. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v.21. p. 207-224, 1985.
- STRUVE, J.; FALCONER, R. A.; WU, Y. Influence of model mangrove trees on hydrodynamics in a flume. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 58, p. 163-171, 2003.
- TCHAMEN, G. W.; KAHAWITA, R. A. modelling wetting and drying effects over complex topography. **Hydrological Processes**, v. 12, p. 1151-1182, 1998.
- UMGIESSER, G.; SUNDERMANN, J.; RUNCA, E. A semi-implicit finite element model for the lagoon of Venice. In:Schrefler, Zienkiewicz (Eds.), **Computer Modelling in Ocean Engineering**. Balkema, Rotterdam, p.71-79, 1988.
- WOLANSKI, E.; JONES, M.; BUNT, J. S. Hidrodynamics of a tidal creek-mangrove swamp system. **Australian Journal of Marine and Freshwater Research**, v.31, p. 431-450, 1980.
- WOLANSKI, E.; MAZDA, Y., KING, B.; GAY, S. Dynamics, flushing and trapping in Hinchinbrook Channel, a giant mangrove swamp, Astralia. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v.31, p. 555-579, 1990.
- WU, Y.; FALCONER, R. A.; STRUVE J. Mathematical modelling of tidal currents in mangrove forests. **Environmental Modeling & Software**, v. 16, p. 19-29, 2001.